



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ

INSTITUTE OF MACHINE AND INDUSTRIAL DESIGN

**ZPRACOVÁNÍ VYSOKOPEVNOSTNÍ HLINÍKOVÉ SLITINY
EN AW 7075 TECHNOLOGIÍ SLM**

PROCESSING OF HIGH-STRENGTH ALUMINUM ALLOY EN AW 7075 USING SLM TECHNOLOGY

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Petr Skalický

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Daniel Koutný, Ph.D.

BRNO 2017

Zadání diplomové práce

Ústav:	Ústav konstruování
Student:	Bc. Petr Skalický
Studijní program:	Strojní inženýrství
Studijní obor:	Konstrukční inženýrství
Vedoucí práce:	Ing. Daniel Koutný, Ph.D.
Akademický rok:	2016/17

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č. 111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Zpracování vysokopevnostní hliníkové slitiny EN AW 7075 technologií SLM

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Aditivní technologie výroby kovových materiálů se v posledních 10 letech výrazně rozšiřují do řady průmyslových odvětví, avšak jejich širší aplikace je stále omezena portfoliem dostupných a ověřených materiálů. Technologie Selective Laser Melting patří mezi nejrozšířenější, avšak i pro tuto technologii je v současné době ověřeno jen přibližně 25 materiálů. Rozšíření portfolia zpracovatelných materiálů umožní kvalifikaci SLM procesu pro další průmyslově zpracovávané komponenty.

Typ práce: výzkumná

Projekt: specifický vysokoškolský výzkum

Cíle diplomové práce:

Hlavním cílem je objasnit vliv jednotlivých procesních parametrů při zpracování hliníkové slitiny EN AW-7075 technologií Selective Laser Melting na výslednou porozitu materiálu a jeho mechanické vlastnosti.

Dílčí cíle diplomové práce:

- definovat materiálové vlastnosti standardně vyráběného materiálu,
- navrhnout experimentální tělesa, metody testování a vyhodnocení,
- navrhnout výrobní strategie a rozsahy ověřovaných parametrů,
- experimentálně popsat vlivy jednotlivých parametrů a strategií.

Požadované výstupy: publikace, průvodní zpráva, fotografická dokumentace, laboratorní protokol, digitální data.

Rozsah práce: cca 72 000 znaků (40 - 50 stran textu bez obrázků).

Struktura práce a šablona průvodní zprávy jsou závazné:

http://dokumenty.uk.fme.vutbr.cz/BP_DP/Zasady_VSKP_2017.pdf

Seznam literatury:

ABOULKHAIR, N. Reducing porosity in AlSi10Mg parts processed by selective laser melting. Additive Manufacturing [online]. Elsevier B.V., 2014, vol. 1-4, s. 77-86. DOI: 10.1016/j.addma.2014.08.001. ISSN 2214-8604.

KEMPEN, K. Mechanical Properties of AlSi10Mg Produced by Selective Laser Melting. Physics Procedia [online]. Elsevier B.V., 2012, vol. 39, s. 439-446. DOI: 10.1016/j.phpro.2012.10.059, ISSN 1875-3892.

KARG, M., O. HENTSCHEL, B. AHUJA a M. SCHMIDT. Determinatin of cooling rates during Laser Beam Melting of aluminium alloy EN AW-7075 using high speed pyrometry. In: 15th Annual Conference of RAPDASA, Rapid Prototyping Association of South Africa [online]. 2014 Získáno z: <http://conferences.sun.ac.za/index.php/rapdasa/rapdasa2014/paper/view/1521>

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2016/17.

V Brně, dne 4. 11. 2016




prof. Ing. Martin Hartl, Ph.D.
ředitel ústavu


doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá zpracováním vysokopevnostní hliníkové slitiny EN AW 7075 technologií Selective Laser Melting a ověřením vlivu procesních parametrů na relativní hustotu a mechanické vlastnosti. Teoretická část práce obsahuje úvod do problematiky aditivní výroby hliníkových slitin, vlivů procesních parametrů a procesů probíhajících při výrobě technologií SLM. Na základě teoretické části byly navrženy experimenty objemových vzorků a způsob jejich vyhodnocení. Vzorky se vyráběly spékáním metalurgického prášku pomocí ytterbiového laseru s maximálním výkonem 400 W. V práci je zkoumán vznik a šíření trhlin uvnitř materiálu, což doposud nebylo v odborné literatuře pro tuto slitinu EN AW 7075 popsáno. Z výsledků práce byly stanoveny závislosti procesních parametrů na relativní hustotu materiálu a vypracován přehled o zpracování této hliníkové slitiny SLM technologií.

KLÍČOVÁ SLOVA

Selective Laser Melting, SLM, EN AW 7075, SLM 280 HL, relativní hustota

ABSTRACT

This diploma thesis deals with processing of high strength aluminum alloy EN AW 7075 by Selective Laser Melting and verify the influence of process parameters on relative density and mechanical properties. The theoretical part contains an introduction to additive manufacturing of aluminum alloys, the influence of process parameters and description of processes occurring during SLM production. Based on the theoretical part were prepared experiments and method of evaluation. Samples were produced by melting metallurgical powder using ytterbium laser with a maximum output power of 400 W. This diploma thesis also describes the formation and growth of cracks inside the material, which so far in the literature for alloy EN AW 7075 were not described. As the result, the process parameters dependence on the relative density and an overview of this aluminum alloy processing by SLM technology is determined.

KEYWORDS

Selective Laser Melting, SLM, EN AW 7075, SLM 280 HL, relative density

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

SKALICKÝ, P. Zpracování vysokopevnostní hliníkové slitiny EN AW 7075 technologií SLM. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2017. 86 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Daniel Koutný, Ph.D..

PODĚKOVÁNÍ

Na tomto místě bych rád poděkoval všem, kteří mi byli nápomocni, jak při vypracovávání této diplomové práce, tak i v průběhu mého dosavadního studia. Zvláště bych chtěl poděkovat mému vedoucímu doc. Ing. Danielu Koutnému, Ph.D za cenné rady a odborné vedení mé diplomové práce. Také bych rád poděkoval rodině za jejich trpělivost a podporu ve dnech strávených psaním této diplomové práce.

PROHLÁŠENÍ AUTORA O PŮVODNOSTI PRÁCE

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci, *Zpracování vysokopevnostní hliníkové slitiny EN AW 7075 technologií SLM*, vypracoval samostatně pod vedením doc. Ing. Daniela Koutného, Ph.D s využitím informací a zdrojů, které jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

V Brně dne 19. května 2017

.....
Bc. Petr Skalický

OBSAH

1	ÚVOD	13
2	PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ	14
2.1	Aditivní technologie výroby	14
2.2	Selective Laser Melting	15
2.2.1	Pre-processing	16
2.2.2	Processing	16
2.2.3	Post-processing	16
2.3	Procesní parametry Selective Laser Melting	17
2.3.1	Vliv skenovací rychlosti a výkonu laseru	17
2.3.2	Vliv vzdálenosti drah laseru	19
2.3.3	Vliv tloušťky vrstvy prášku	20
2.4	Negativní procesy vznikající při výrobě SLM	21
2.4.1	Balling efekt	21
2.4.2	Vznik pórů	21
2.4.3	Marangoniho efekt	23
2.4.4	Vznik trhlin	24
2.5	Svařování hliníkové slitiny EN AW 7075 laserem	25
3	ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE	26
4	MATERIÁL A METODY	27
4.1	Použitý materiál	27
4.1.1	Hliníková slitina EN AW 7075 (AlZn5,5MgCu)	27
4.1.2	Chemické složení a značení	27
4.1.3	Práškový materiál	28
4.2	Výrobní zařízení	29
4.3	Experiment	31
4.3.1	Příprava experimentu	31
4.3.2	Příprava zařízení	34
4.3.3	Příprava práškového materiálu	35
4.4	Hodnocení experimentu	35
4.4.1	Příprava vzorků	35
4.4.2	Určení porozity	36
5	VÝSLEDKY	38
5.1	Analýza prášku	38
5.1.1	Distribuce částic	38
5.2	Objemové vzorky	39
5.2.1	Objemový test I	39
5.2.2	Objemový test II	43
5.2.3	Objemový test III	48
5.2.4	Objemový test IV	50
5.3	Experiment s využitím podpůrných struktur	53
5.4	Objemové vzorky s využitím zvýšené teploty	56
5.5	Mikrostruktura	61
5.6	Tvrdost	62
5.6.1	Referenční materiál	63
5.6.2	SLM materiál	63
6	DISKUZE	65

7	ZÁVĚR	68
8	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	69
9	SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN	72
10	SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ	73
11	SEZNAM TABULEK	76
12	SEZNAM PŘÍLOH	77

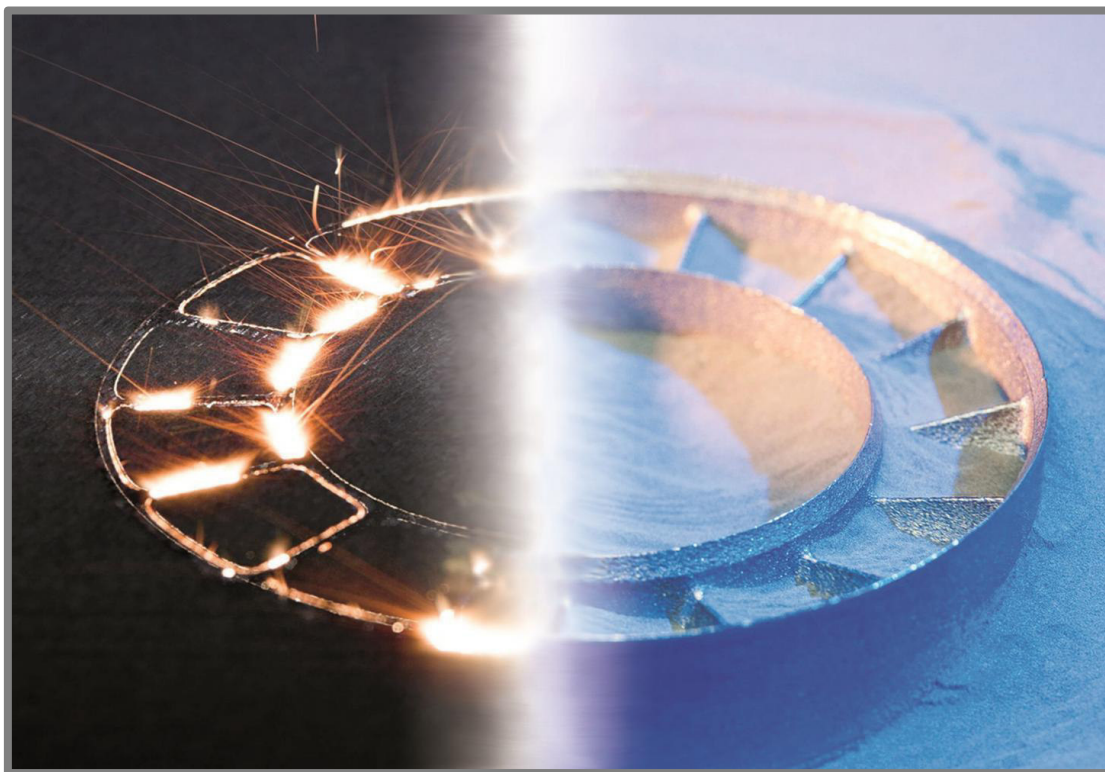
1 ÚVOD

1

Selective Laser Melting (SLM) patří mezi tzv. aditivní technologie, využívající k výrobě součástí jemný kovový prášek. Tento prášek je po jednotlivých vrstvách taven a spojován s předchozími vrstvami do té doby, než je vytvořena kompletní geometrie součásti. Předlohou bývá 3D CAD model, který je v počítačovém programu „rozřezán“ na jednotlivé vrstvy. Pro každou z nich je vygenerována dráha laseru [1]. Metoda výroby SLM je využívána zejména v leteckém nebo automobilovém průmyslu pro výrobu součástí s komplikovanou geometrií, odlehčený nebo topologicky optimalizovaných konstrukcí a také v biomedicině.

Výroba technologií SLM odstartovala zhruba v druhé polovině 90. let [2]. Tato technologie není schopná z hlediska produktivity konkurovat konvenčním metodám. Přínosem je však právě tvorba unikátních dílů se složitou geometrií, jejichž výroba je konvenčními metodami nedosažitelná. Díky postupnému vývoji a zdokonalování laserových zdrojů, hlavně navyšování jejich výkonu, narůstá i počet materiálů, které lze pro výrobu touto technologií využít. Enormní zájem je v dnešní době o výrobu součástí technologií SLM z hliníkových materiálů. Tyto součásti se díky vlastnostem hliníkových slitin vyznačují velmi dobrým poměrem pevnosti a hmotnosti součásti.

Diplomová práce je zaměřena na zpracování vysokopevnostní hliníkové slitiny EN AW 7075, která disponuje velmi vysokou pevností v tahu a vysokou tvrdostí. Znatelnou překážkou pro výrobu SLM z tohoto materiálu je jeho obtížná svařitelnost, protože jak již bylo řečeno, principem technologie je spékání (svařování) kovového prášku. Proto bude nutné nalézt a nalézt optimální procesní parametry výroby SLM této hliníkové slitiny.

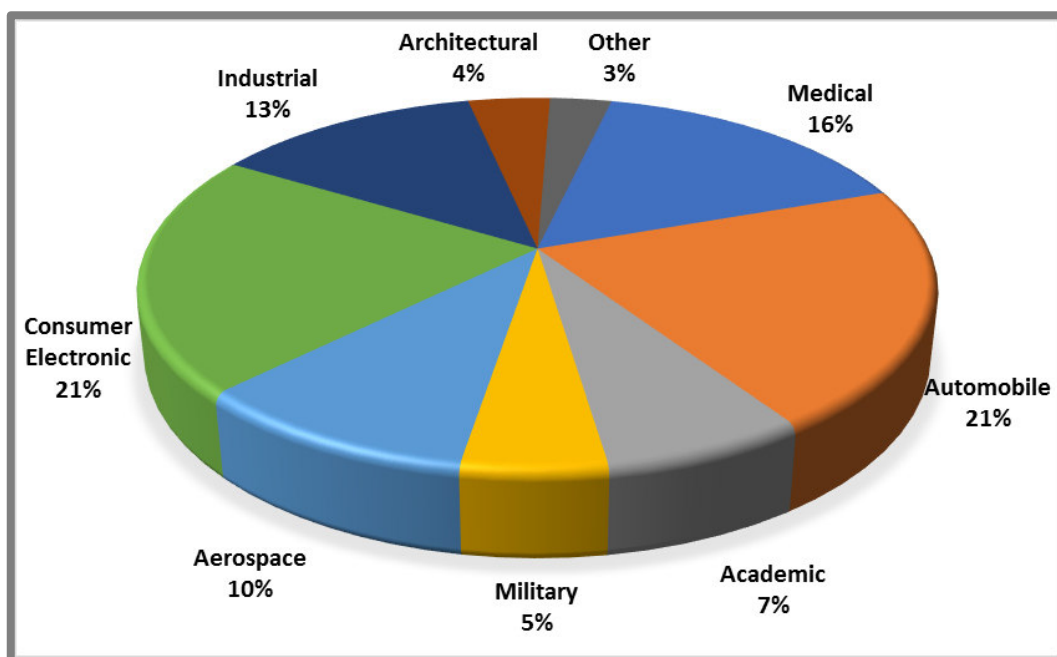


Obr. 1-1 Průběh vyrábění a finální vyrobená součást [3]

2 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

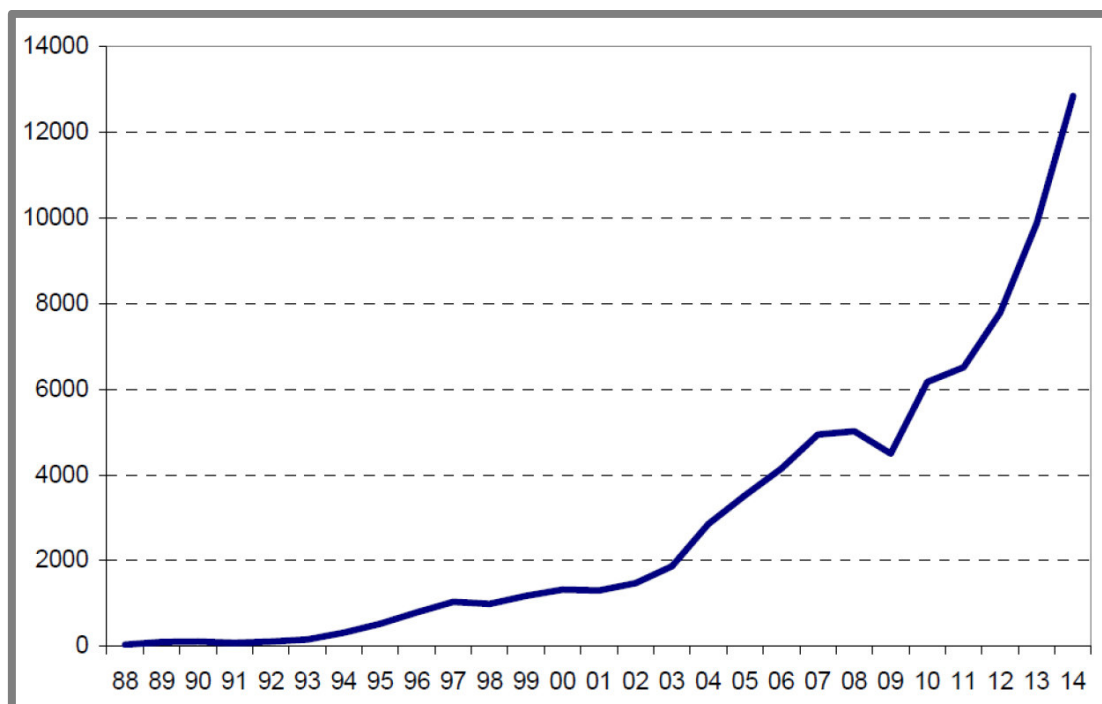
2.1 Aditivní technologie výroby

Počátky aditivních technologií spadají do druhé poloviny 20. století. Vyvrcholením bylo patentování první aditivní technologie tzv. stereolitografie (SLA) v roce 1986 [4]. Od té doby již existuje řada dalších aditivních technologií zpracovávajících různé druhy materiálů. Podstatou všech dosud známých aditivních technologií je postupné přidávání materiálu po jednotlivých vrstvách do té doby, než je vyrobena celá součást. Tento princip je klíčem k výrobě součástí, které jsou konvenčními metodami nedosažitelné. Hlavně součásti s redukovanou hmotností při zachování mechanických vlastností, především pevnosti.



Obr. 2-1 Oblasti využití aditivní výroby [5]

Aditivními technologiemi jsou vyráběny prototypové součásti, modely pro prezentační účely, prototypy licích forem ale i funkční licí formy, dokonce i funkční finální součásti. Všechny tyto výrobky nalézají uplatnění v širokém pásmu využití. Hlavní oblasti využití součástí zhotovených aditivními technologiemi jsou v procentuálním vyjádření patrné na obrázku 2-1. V poslední době je velmi patrný rozmach těchto technologií, který je reprezentován vzrůstajícím počtem prodaných průmyslových zařízení (viz Obr.2-2). Nejvíce rozvíjející jsou aditivní technologie zpracovávající plastové a kovové materiály. Tato diplomová práce se zabývá technologií Selective Laser Melting, která patří do odvětví aditivních technologií zabírajících se výrobou z kovových materiálů.

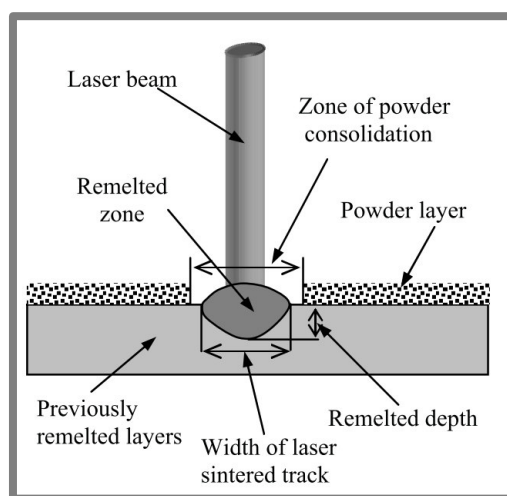


Obr. 2-2 Počet ročně prodaných průmyslových zařízení pro aditivní výrobu [6]

2.2 Selective Laser Melting

2.2

Selective Laser Melting umožňuje tvorbu kovových komponent s takřka libovolnou geometrií. Stejně jako u ostatních aditivních technologií je součást realizována postupným vrstvením materiálu. Základním principem je natavení kovového prášku paprskem laseru (viz. Obr.2-3). Podmínkou pro spojení vrstev je částečné natavení i předchozí vrstvy. Výrobu komponent touto technologií lze rozdělit do tří základních kroků: Pre-processing (příprava), Processing (proces výroby) a Post-processing (dokončovací operace).



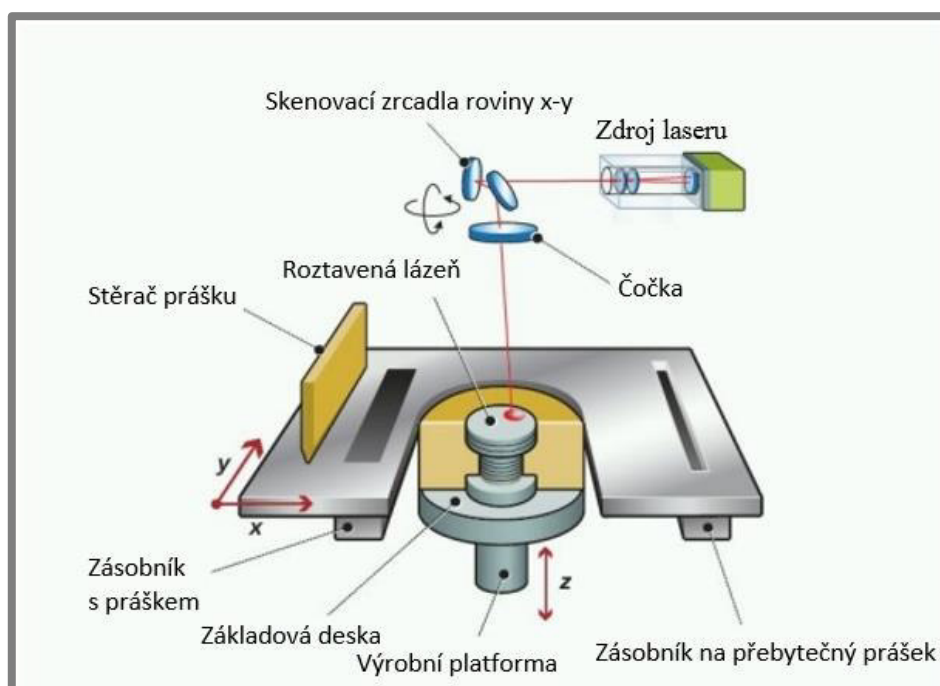
Obr. 2-3 Princip tvorby jednotlivých návarů [7]

2.2.1 Pre-processing

Základními vstupními daty je 3D CAD model, který je nutné převést na formát STL (STereoLithography). STL formát převede původní geometrii modelu na trojúhelníkovou síť a následně je provedena kontrola a případné úpravy sítě. Takto upravený model je dále zpracováván ve speciálním softwaru, který je kompatibilní s výrobním zařízením (např. Materialise Magics). Zde je model rozřezán na jednotlivé vrstvy a doplněn o podpůrné struktury. V případě výroby SLM neplní pouze funkci podpory, ale také slouží k odvodu tepla. Finální krok představuje vygenerování a zaslání kódu do výrobního zařízení (tiskárny). [1]

2.2.2 Processing

Výroba probíhá v hermeticky uzavřené komoře. Schéma výroby uvnitř komory je znázorněno na obrázku 2-4. Ze zásobníku prášku je pomocí stěrače prášku nanášena tenká vrstva o předem definované tloušťce. Laserový paprsek je usměrněn na dané místo pomocí skenovacích zrcadel a zaměřován pomocí čočky. Pohyblivá výrobní platforma klesne po každé vrstvě právě o tloušťku jedné vrstvy. Cyklus se opakuje do té doby, než vznikne kompletní součást.



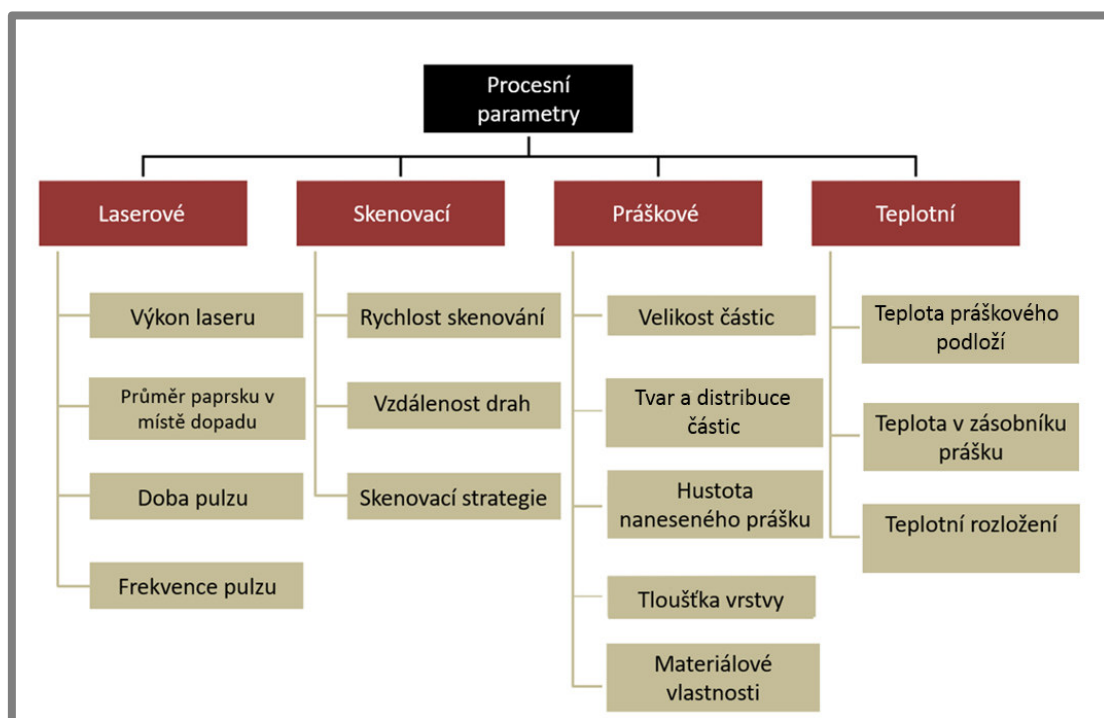
Obr. 2-4 Schéma principu SLM [8]

2.2.3 Post-processing

Zhotovená součást je zbavena přebytečného prášku, oddělena od výrobní platformy případně se odstraní podpůrné struktury. Poté je možné součástky zpracovávat obdobně jako u konvenčních metod výroby. Tím je myšleno např. obrábění ploch, broušení, pískování nebo tepelné zpracování. [1]

2.3 Procesní parametry Selective Laser Melting

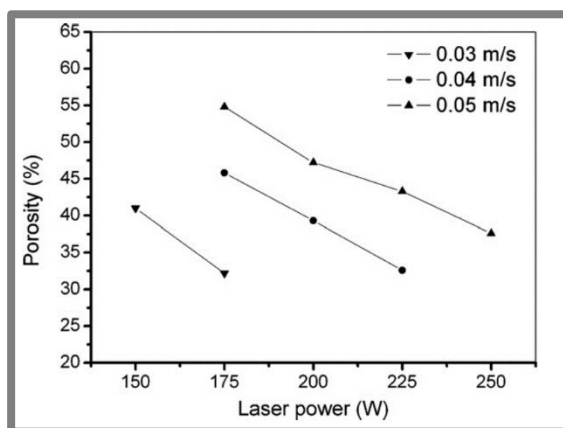
Postup výroby technologií SLM zahrnuje velké množství fyzikálních jevů jako je např. přenos tepla, absorpce a rozptyl laserového záření, fázové přeměny materiálů atd. Samotnou výrobu je možné řídit pomocí nastavení tzv. procesních parametrů, které mohou být kontrolovány během tisku (viz Obr. 2-5). Mezi hlavní procesní parametry se řadí skenovací rychlost (scan speed), vzdálenost mezi jednotlivými drahami laseru (hatch spacing), výkon laseru (laser power) a tloušťka nanášené vrstvy (layer thickness) [9]. Všechny tyto parametry ovlivňují zejména mikrostrukturu tedy i mechanické vlastnosti součásti a drsnost výsledného povrchu. V této práci je tedy hlavním cílem stanovit takové procesní parametry, aby výsledná struktura byla co nejméně porézní neboli aby součást měla co nejvyšší relativní hustotu.



Obr. 2-5 Přehled procesních parametrů [9]

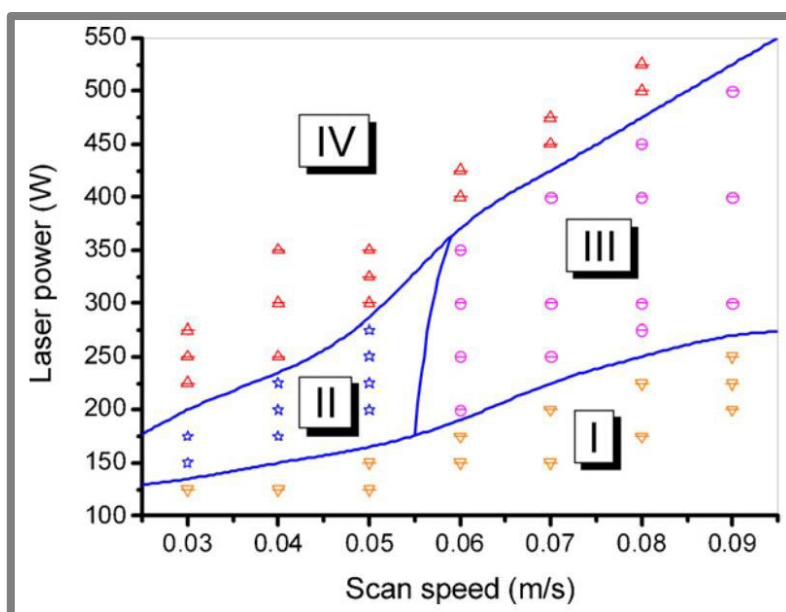
2.3.1 Vliv skenovací rychlosti a výkonu laseru

Mezi parametry, které nejvíce ovlivňují kvalitu výsledné struktury, patří výkon laseru a skenovací rychlost. Tyto parametry mají zásadní vliv na energii, která je předávána prášku. *Dongdong Gu* [10] ve své práci pozoroval vliv výkonu laseru na výsledné porozitě. U různých skenovacích rychlostí bylo patrné, že pro vyšší výkon laseru se dosahovalo u materiálu 316L nižších hodnot porozity. Z obrázku 2-6 je patrné, že porozita se v tomto případě pohybovala v rozmezí 30-60 %. Tato vysoká porozita je způsobena použitím nízkého výkonu laseru pro výrobu z nerezové oceli 316L.



Obr. 2-6 Závislost výkonu laseru na výsledné porositě pro materiál 316L [10]

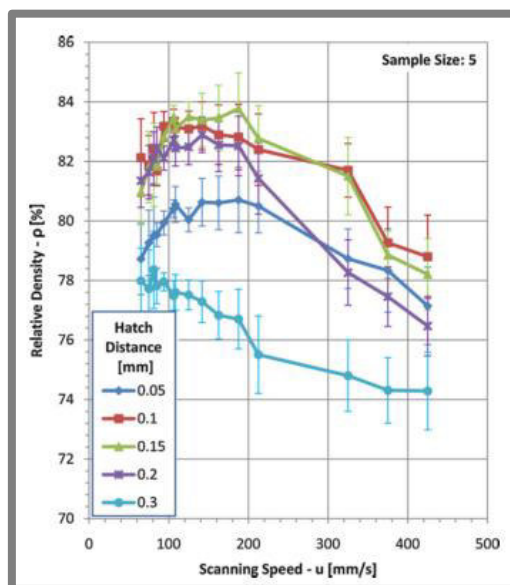
Dále se také věnoval závislosti výkonu laseru na skenovací rychlosti (viz Obr. 2-7). Sledována byla závislost mezi těmito procesními parametry vzhledem ke kvalitě jednotlivých návarů. Výsledná závislost (tzv. procesní mapa) je rozdělena na čtyři oblasti, kde nejlepší je oblast IV, která obsahuje pouze kompletní a kontinuální svary.



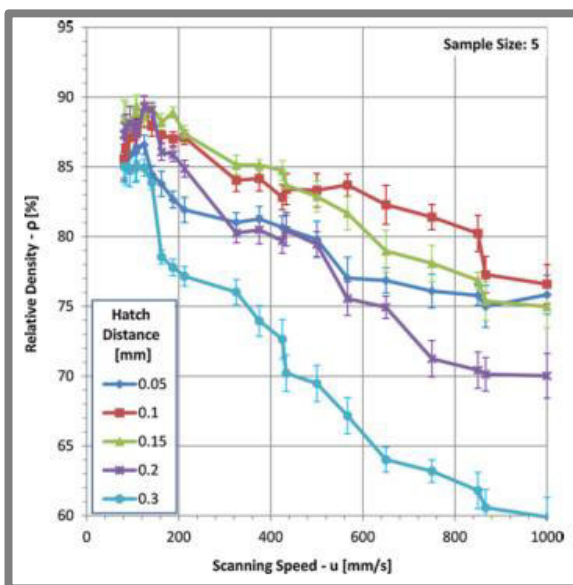
Obr. 2-7 Procesní mapa pro určení optimálního výkonu laseru a rychlosti skenování [10] i

- (I) – **Žádné natavení materiálu**: energie laseru je nedostatečná
- (II) – **Částečné natavení materiálu**: mírný výkon laseru v kombinaci s nízkou rychlostí skenování. Vzniká povrchové tavení částic, které ve výsledku způsobí porézní povrch.
- (III) – **Vznik necelistvých návarů**: Při použití vysokého výkonu laseru společně s vysokou skenovací rychlostí má za následek vzniku tenkých a dlouhých svarů, které se následně rozpadají na hrubé kovové kapičky v důsledku snížení povrchového napětí.
- (IV) – **Kompletní protavení materiálu**: Dopadající energie je dostatečně velká k vytvoření kontinuálního svaru a celistvého materiálu po ztuhnutí.

E. Louvis [11] provedl výzkum vlivu skenovací rychlosti na relativní hustotě součásti. Pokus se zaměřoval i na vliv různých hodnot vzdálenosti drah laseru. Proveden byl s výkonem laseru 50 W a 100 W. Jako zkušební materiál použil *Louvis* hliníkovou slitinu 6061. Z charakteristik (viz Obr. 2-8 a 2-9) je názorně patrné, že pro materiál 6061 je nejvýhodnější z hlediska relativní hustoty využít při daném výkonu laseru skenovací rychlost v rozmezí 100-200 mm/s a vzdálenost mezi jednotlivými drahami laseru 0,15 mm. Zvýšením výkonu laseru z 50 W na 100 W je docílen nárůst relativní hustoty přibližně o 5 %.



Obr. 2-9 Vliv skenovací rychlosti; výkon laseru 50 W [11]

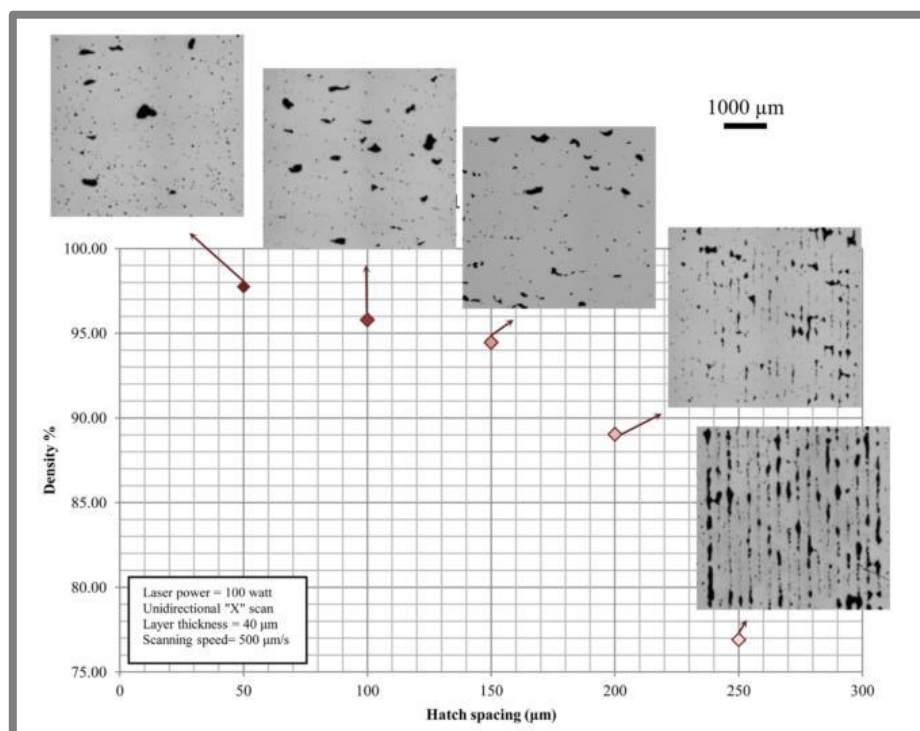


Obr. 2-8 Vliv skenovací rychlosti; výkon laseru 100 W [11]

2.3.2 Vliv vzdálenosti drah laseru

Vzdálenost drah laseru odpovídá rozteči dvou sousedních návarů. Pokud je vzdálenost moc velká, vznikají mezery mezi sousedními návary, čímž zvyšují porozitu materiálu. Tyto póry lze pozorovat na leštěných výbrusech a řezech. Jsou to „kapsy“ vyplněné neroztaveným práškem. Mezery se dají odstranit dostatečným překrytí mezi drahami laseru. Ověření vlivu vzdálenosti drah laseru provedl *Nesma T. Aboulkhair* [9], který ke svému pokusu využil hliníkový materiál AlSi10Mg . Výsledkem byla závislost vzdálenosti drah na hustotě vyrobeného vzorku (viz Obr. 2-13). Pro tento materiál bylo nejlepších výsledků dosaženo v rozmezí 50–100 μm .

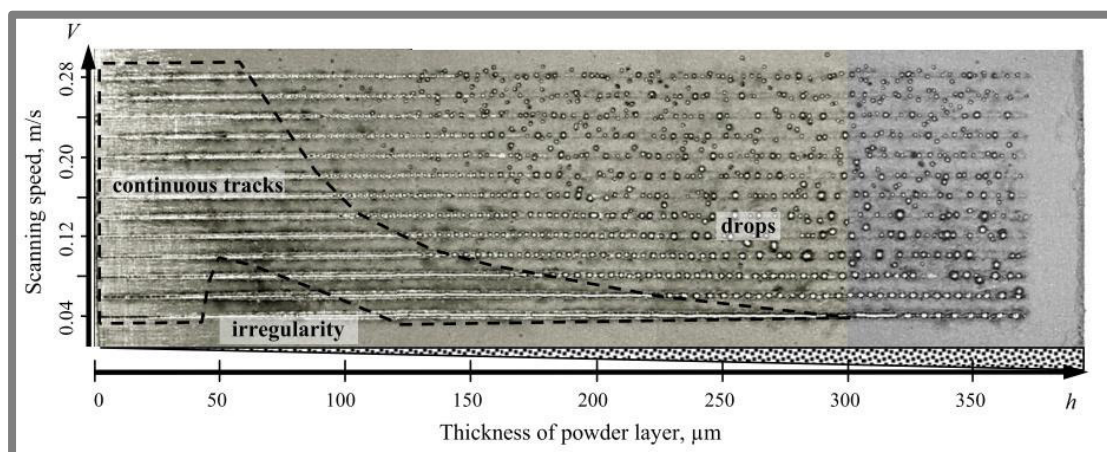
2.3.2



Obr. 2-10 Závislost vzdálenosti drah laseru na relativní hustotě [9]

2.3.3 Vliv tloušťky vrstvy prášku

Na výslednou strukturu součásti má zásadní vliv také tloušťka jednotlivých vrstev kovového prášku. Nejlépe jde ovlivnění kvality svaru pozorovat na liniových vzorcích. Liniový vzorek představuje vypálení jedné dráhy laseru do vrstvy prášku. Závislost tloušťky vrstvy na skenovací rychlosti ve své publikaci názorně uvedli *I.Yadroitsev a I. Smurov* [7]. Vyhodnocení této charakteristiky bylo z hlediska kvality svaru (viz. Obr.2-11).



Obr. 2-11 Vliv tloušťky vrstvy prášku na kvalitu liniového vzorku [7]

Celé pole těchto liniových vzorků je rozděleno na tři oblasti. Oblast „drops“ představuje ty části vzorků, kdy dochází k rozčlenění kontinuálního svaru na drobné kapičky (viz. kapitola 2.4.1). „Irregularity“ neboli nepravidelnost reprezentuje nejmenší oblast. V této části se vyskytují návary s proměnou šířkou. Poslední oblast se nazývá „continuous track“, která obsahuje pouze celistvé (kontinuální) svary.

Z obrázku 2-11 je na první pohled patrný vliv tloušťky vrstvy prášku na kvalitu svaru. Se zvyšující se skenovací rychlostí klesá rozsah vhodné tloušťky vrstvy prášku. Nejvýhodnější je použít tloušťky vrstvy prášku do 60 μm .

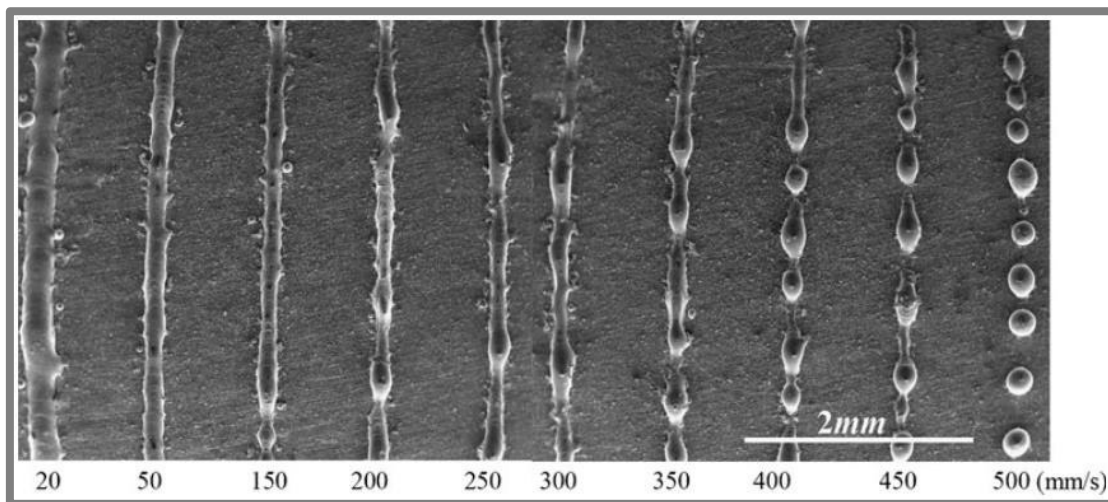
2.4 Negativní procesy vznikající při výrobě SLM

2.4

2.4.1 Balling efekt

2.4.1

Balling efekt lze pozorovat při vyšších rychlostech skenování, kdy se nevytváří kontinuální návar, ale je „rozkouskovan“ na drobné kapičky s kulovitým nebo elipsoidním tvarem. Tento jev je způsoben vlivem snížení povrchové napětí taveniny a nelineárního tuhnutí [9]. Balling efekt negativně ovlivňuje nejen relativní hustotu, ale také povrch vyrobené součásti. Vzniklé kapičky mohou být větší než vyrobená vrstva a při následném nanášení další vrstvy prášku může být poškozen stírací břit recoateru, nebo znehodnocena celá součást. *Ruidi Li* [12] zkoumal vliv procesních parametrů (výkon laseru, skenovací rychlost a tloušťka vrstvy) na vznik kapek při zpracování niklového prášku a prášku z nerezové oceli. U těchto dvou materiálů bylo zjištěno, že procesní parametry mají markantní vliv právě na vznik balling efektu. Se zvyšující se skenovací rychlostí dochází k pulzaci šířky svaru, následně dochází k pulzaci šířky návaru a v poslední fázi k tvorbě nekontinuálních svarů a vzniku výše zmíněných kapiček (viz. Obr. 2-12). Nejlepších výsledků bylo dosaženo pro nižší skenovací rychlosti, menší tloušťky vrstev a využití vyšších hodnot výkonu laseru.



Obr. 2-12 Porovnání jednotlivých svarů pro různé hodnoty skenovací rychlosti [12]

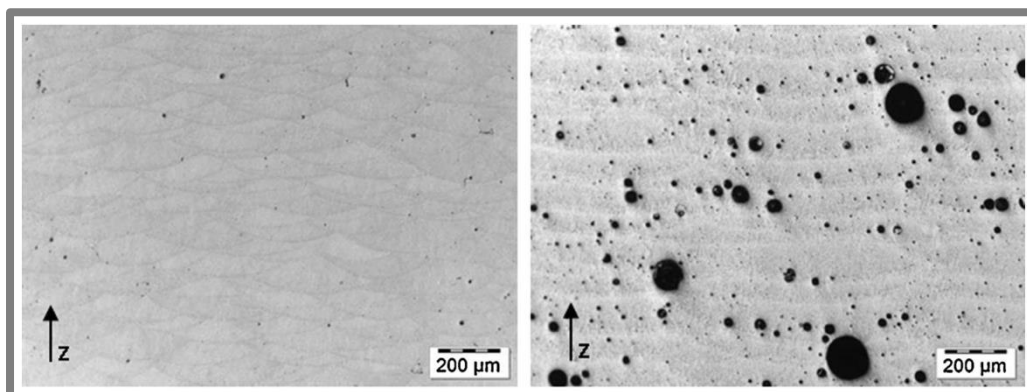
2.4.2 Vznik pórů

2.4.2

Předpoklad pro dobré mechanické vlastnosti zajišťuje vysoká relativní hustota vyrobeného materiálu blízká se ideálně hodnotě kolem 100 %. Na relativní hustotu mají vliv nejen procesní parametry, ale také trhliny a defekty vzniklé při výrobě. Tyto póry lze kategorizovat na metalurgické a tzv. Keyhole póry [9].

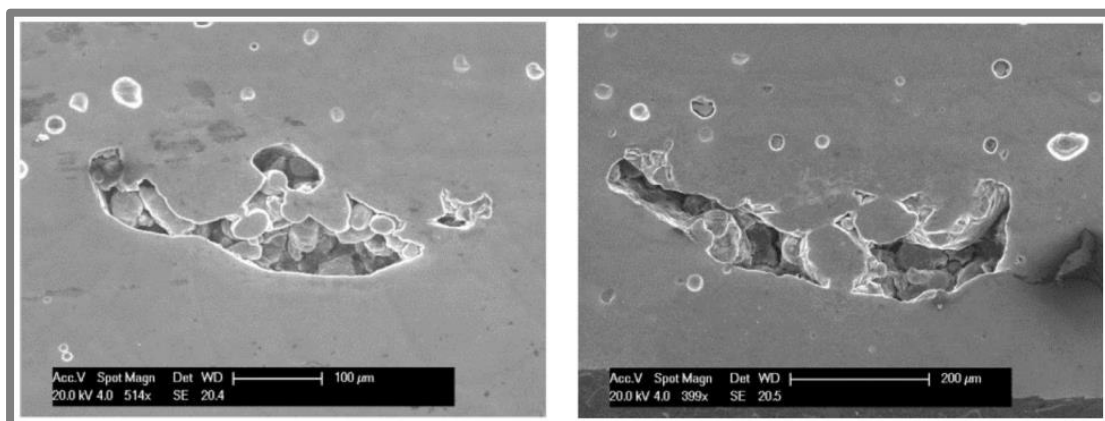
Metalurgické póry: mohou být také známy pod pojmem hydrogen porozita. Jsou to malé (menší než 100 μm) a sféricky tvarované nedokonalosti uvnitř struktury materiálu (viz. Obr. 2-13). Vznikají při nízkých skenovacích rychlostech z plynů zachycených v roztavené lázni důsledkem obsahu kyslíku v inertní atmosféře.

Metalurgické póry není možné úplně eliminovat pouze změnou procesních parametrů [13].

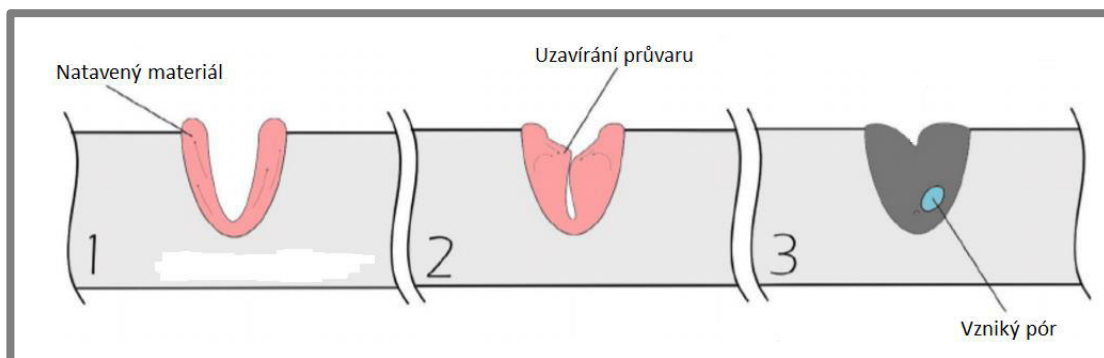


Obr. 2-13 Metalurgické póry (hydrogen porosity) při rychlosti skenování 2250 a 250 mm/s [13]

Keyhole póry: na rozdíl od metalurgických pórů keyhole póry (viz. Obr. 2-14) vznikají při vyšších skenovacích rychlostech v důsledku rychlého tuhnutí. Vznik keyhole póru je patný na obrázku 2-15. Natavený materiál je vytlačován tlakem zpětného rázu. Při ukončení působení laserového záření, začne nahromaděný materiál v horní části průvar uzavírat. Rychlým tuhnutím vznikne ve spodní části průvaru pór s nepravidelným tvarem. K tvorbě keyhole pórů výrazně napomáhá balling efekt. [14], [15]



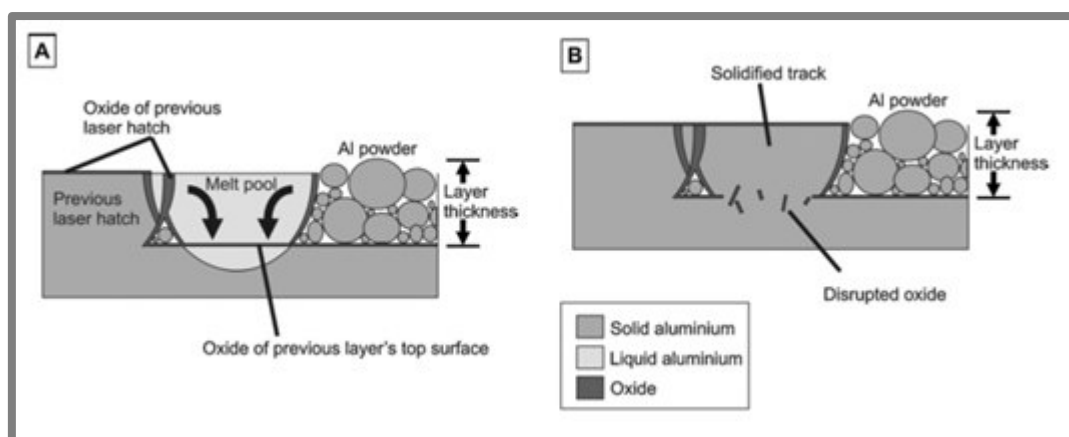
Obr. 2-15 Keyhole póry s "uvězněným" neroztaveným práškem [14]



Obr. 2-14 Vznik key hole póru [15]

2.4.3 Marangoniho efekt

Kovové hliníkové prášky mají na povrchu každé částice tenkou vrstvu oxidů. Tato vrstva ovlivňuje smáčivost, ale také výslednou porozitu materiálu. Při svařování se oxidy dostávají na okraje roztavené lázně. Pro zlepšení smáčivosti a spojení vrstvy s předchozí je nutné tyto oxidy porušit (viz. Obr. 2-16). Vrstva oxidů na povrchu lázně také snižuje povrchové napětí. Gradient povrchových napětí vyvolaný teplotním přechodem mezi pevným a kapalným skupenství způsobuje uvnitř roztavené lázně proudění. Toto proudění způsobují tzv. Marangoniho síly. Vzniklé síly napomáhají proražení vrstvy oxidů, ale pouze na spodní straně, boční oxidy zůstanou neporušeny. Jak je patrné na obrázku 2-16 b, neporušené sousední vrstvy oxidů na bocích návaru vytvoří vzduchovou bublinu se zbytky neroztaveného prášku. [11]

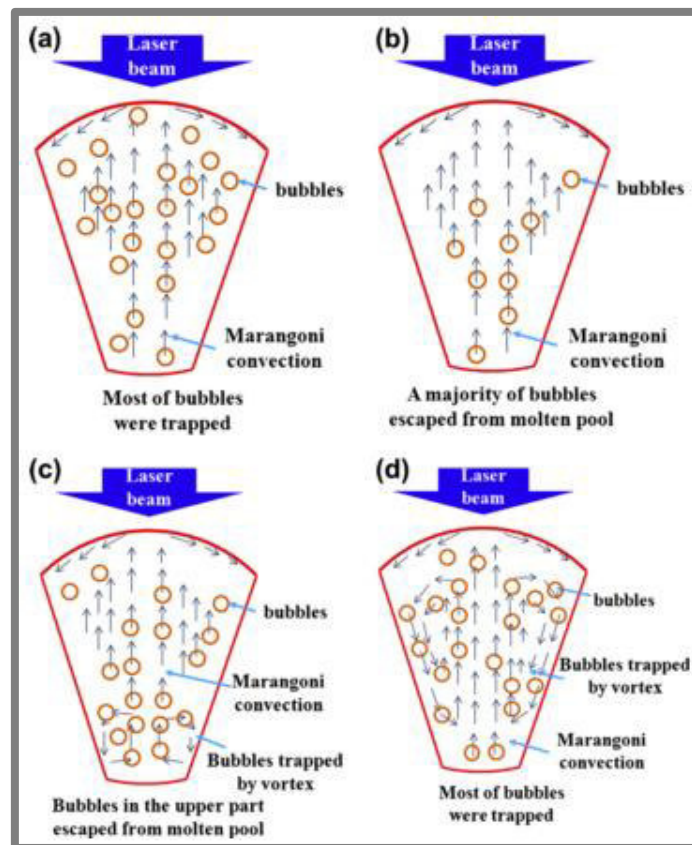


Obr. 2-16 Vliv Marangoniho sil a proudění v tavenině [11];

a) Popis proudění v tavenině

b) Narušení oxidů a tuhnutí taveniny

Proudění uvnitř roztavené lázně ovlivňuje chování a pohyb bublinek plynu (hydrogen porozita). Touto problematikou se v odborné publikaci zabývali *Donghua Dai* a *Dongdong Gu* [16], kteří tento jev zkoumali u zpracování mědi technologií SLM. Na základě výzkumu stanovili čtyři hodnoty lineární hustoty energie (LED), která nejvíce závisí na výkonu laseru a skenovací rychlosti. Tato energie velmi ovlivňuje nejen pohyb bublinek plynu v tavenině, ale také jejich rychlost. Pohyb bublinek je opět způsoben marangoniho silami. Pro vyšší hodnoty LED vznikají v tavenině vlivem marangoniho sil vířivé proudy. Může dokonce vznikat rozstřík taveniny a balling. Vliv velikosti LED na pohyb bublinek uvnitř taveniny naznačuje obrázek 2-17.



Obr. 2-17 Schématický popis pohybu bublin uvnitř taveniny pro různé hodnoty LED [16]

- (a) LED 15 kJ/m - Většina bublin zůstává uvězněna pod povrchem taveniny z důvodu nedostatečné rychlosti. Teplota taveniny dosahuje až 1420 K.
- (b) LED 17,5 kJ/m – Bubliny mají vyšší rychlost a většina unikne z taveniny nad její povrch.
- (a) LED 20 kJ/m – Bubliny, které se nachází blízko povrchu lázně, uniknou. Zbývající bubliny plynu jsou stahovány do středu lázně vířivými proudy v tavenině.
- (a) LED 22,5 kJ/m - Většina bublin je stahována vířivými proudy do středu taveniny, čímž je způsobeno velké množství pórů v materiálu.

2.4.4 Vznik trhlin

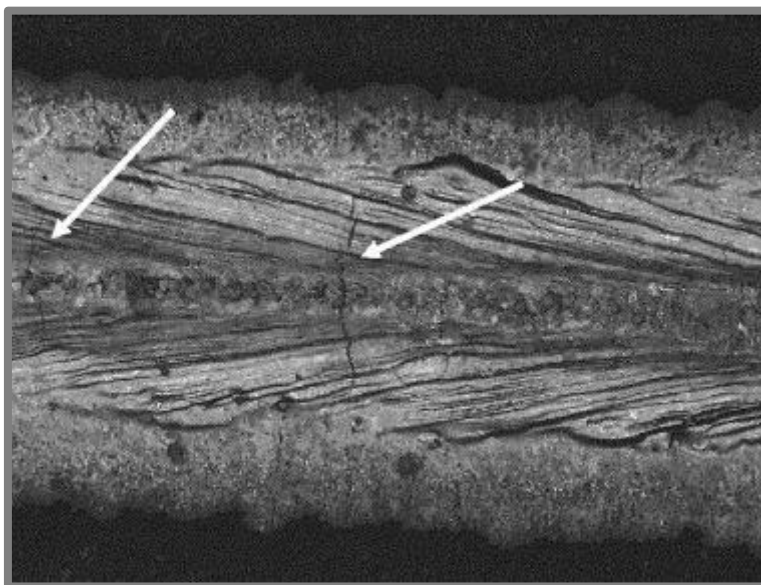
Vznik trhlin uvnitř materiálu v průběhu výroby SLM má podstatný vliv na výsledné mechanické vlastnosti. Pokud se ve struktuře materiálu při výrobě objeví trhliny, výsledné mechanické vlastnosti dosahují velmi nízkých hodnot. Trhliny vznikají při tuhnutí roztaveného materiálu, zejména v pozdním stádiu tuhnutí tzv. meltpoolu. V tomto okamžiku se materiál smršťuje, vzniká vnitřní napětí a tím iniciuje vznik trhliny. Olakanmi, E.O [1] uvádí, že hliníkové materiály jsou na tento jev velmi náchylné. Způsobeno je to velkým rozsahem teplot tuhnutí a vysokým koeficientem

tepelné roztažnosti, tedy velkým smrštěním materiálu při tuhnutí. Trhliny lze eliminovat snížením rychlosti tuhnutí roztavené lázně. Další možnost uváděnou *Olakanmi, E.O* je využití tzv. PW laseru (pulzní režim laseru), který oproti CW laseru (kontinuální režim laseru) vytváří ve výsledné struktuře materiálu jemnější zrna a umožňuje větší flexibilitu řízení procesu.

2.5 Svařování hliníkové slitiny EN AW 7075 laserem

2.5

Této problematice se ve své publikaci věnoval *Hu B.* [17]. Zabýval se svařováním tepelně zpracovatelných hliníkových slitin 2024 a 7075. Uvedl, že největší problém při svařování těchto slitin je hlavně vznik trhlin uvnitř svaru. Při experimentech byly svařovány plechy o tloušťce 2 mm. U většiny testovaných svarů s plným provařením materiálu se objevily příčné trhliny (viz Obr.2-18) a periodicky se objevovali trhliny podél svarového švu. Celkový počet přítomných trhlin se zvyšoval s nárůstem svařovacího výkonu a se zvyšující se rychlostí pojezdu. Detailnějším zkoumáním bylo zjištěno, že trhliny vznikají v místě svaru a následně se šíří podél dendritových hranic. Většina trhlin jsou takzvané solidifikační, ke kterým dochází v době, když jsou svary ještě polotuhém stádiu. *Hu B.* dále uvádí, že pro minimalizaci trhlin je možné využít dodatečný zdroj tepla ke změně rozložení teploty.



Obr. 2-18 příčné trhliny nalezené ve vzorcích svaru z materiálu 7075 [17]

3 ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE

Aditivní technologie výroby kovových materiálů se v posledních 10 letech výrazně rozšiřují do řady průmyslových odvětví, avšak jejich širší aplikace je stále omezena portfoliem dostupných a ověřených materiálů. Technologie Selective Laser Melting patří mezi nejrozšířenější, avšak i pro tuto technologii je v současné době ověřeno jen přibližně 25 materiálů [18]. Rozšíření portfolia zpracovatelných materiálů umožní kvalifikaci SLM procesu pro další průmyslově zpracovávané komponenty.

Proces výroby touto technologií je relativně složitý a obsahuje mnoho fenoménů. Základem je zajištění vlastností a parametrů kovového prášku vstupujícího do procesu. Významnými požadavky na kvalitu prášku jsou velikost částic a její distribuce, tvar jednotlivých částic a chemické složení. Z hlediska výroby jsou důležité optické i tepelné vlastnosti jako odrazivost (laserového paprsku), absorpce a vedení tepla. Samotná výroba je řízena velkým množstvím tzv. procesních parametrů, které více či méně ovlivňují jak průběh „tisku“, tak i samotnou kvalitu výsledné struktury materiálu. Každý materiál má své specifické procesní parametry, které je nutné u nezpracovaných materiálů zkoumat a optimalizovat. Cílem je nalezení vhodného nastavení těchto parametrů, tak aby bylo docíleno co nejvyšší relativní hustoty materiálu. S rostoucí relativní hustotou se zlepšují i mechanické vlastnosti. Relativní hustota vzorků je ovlivněna obsahem póru a trhlin, které v materiálu vznikají v průběhu výroby. Zásadní vliv na mechanické vlastnosti mají hlavně trhliny, které vznikají v závislosti na rychlosti tuhnutí při fázové přeměně mezi taveninou a solidem (pevným materiálem).

Cíle diplomové práce

Hlavním cílem je objasnit vliv jednotlivých procesních parametrů při zpracování hliníkové slitiny EN AW-7075 technologií Selective Laser Melting na výslednou porozitu materiálu a jeho mechanické vlastnosti.

Díličí cíle:

- definovat materiálové vlastnosti standardně vyráběného materiálu,
- navrhnout experimentální tělesa, metody testování a vyhodnocení,
- navrhnout výrobní strategie a rozsahy ověřovaných parametrů,
- experimentálně popsat vlivy jednotlivých parametrů a strategií.

4 MATERIÁL A METODY

4.1

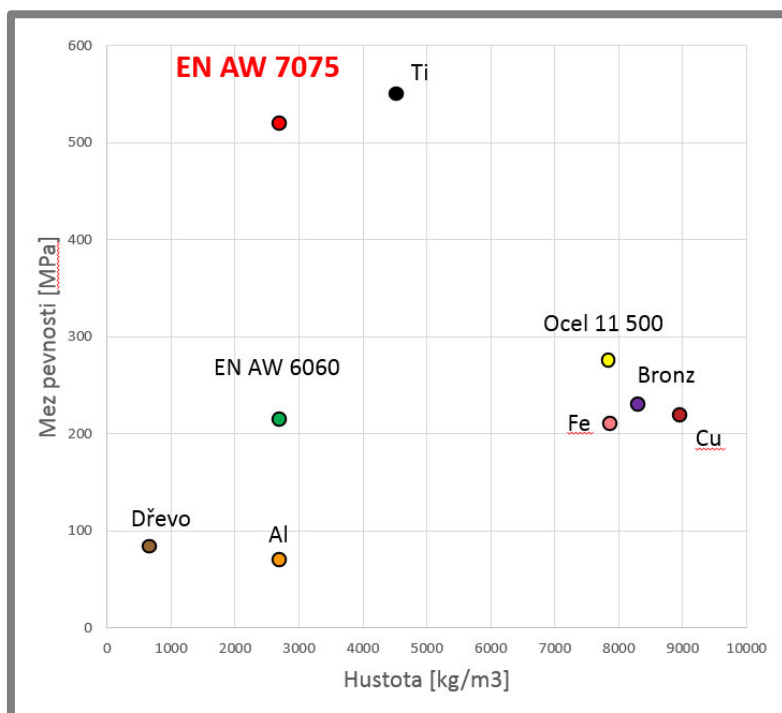
4.1 Použitý materiál

4.1.1

4.1.1 Hliníková slitina EN AW 7075 (AlZn5,5MgCu)

Hliníková slitina EN AW 7075 bývá často nazývána leteckým durallem a patří mezi vůbec nejpevnější hliníkové slitiny. Vyznačuje se dobrou odolností proti korozi (ne za napětí), pevností v tahu kolem 500 MPa a tvrdostí až 160 HB. Vysoký potenciál pro využití ve strojírenské výrobě získává díky nízké hustotě (2700 kg/m^3) a dobrým mechanickým vlastnostem. Z čehož vyplývá, že vyrobené součásti z tohoto materiálu disponují vysokým poměrem pevnosti a hmotnosti. Srovnání s dalšími materiály je vidět na obrázku 4-1. Nevýhodou slitiny je citlivost na vrubový účinek a špatná svařitelnost.

Využívá se hlavně u vysoce namáhaných konstrukcí např. pro letecké konstrukce a zařízení pro přepravu, kde je kladen důraz na součásti vysokou pevností a zároveň nízkou hmotností. Z tohoto materiálu jsou vyráběny i některé komponenty hydraulických zařízení. [19]; [20]



Obr. 4-1 Orientační závislost meze pevnosti a hustoty materiálů

4.1.2 Chemické složení a značení

4.1.2

Dle normy: *Označování hliníku a slitin hliníku pro tváření podle ČSN EN 573-1 až 3*, patří hliníková slitina EN AW 7075 do třídy hliníkových slitin s označením 7xxx. Tato skupina obsahuje nejpevnější z hliníkové slitiny, u kterých je hlavním legujícím prvkem zinek (Zn). Zinek slitině zvyšuje pevnost, ale zhoršuje houževnatost a odolnost proti korozi. Dalšími legujícími prvky u materiálu EN AW 7075 jsou hořčík a měď. Procentuální zastoupení těchto prvků je uvedeno v tab.4-1.

Tab. 4-1 Legující prvky materiálu EN AW 7075 dle normy [21]

Zn	Mg	Cu	Fe	Cr	Si	Mn
5,1-6,1	2,1-2,9	1,2-2	≤0,5	0,18-0,28	≤0,4	≤0,3

Značení této slitiny je možné provést hned několika způsoby, dle norem EN, DIN a ČSN viz. tab.4-2.

Dle evropské normy začíná označení předponou EN následovanou písmeny AW, kde A značí, že se jedná o hliníkový materiál a W určuje vhodnost materiálu pro tvářené výrobky. První číslo udává třídu materiálu (1-8) a druhé modifikaci dané slitiny (0 – prvotní slitina). Poslední dvojčíslí slouží k rozlišení materiálu v rámci dané skupiny slitin. V normách ČSN jsou hliníky označovány vždy samostatnou normou ČSN a šestimístním číslem. První dvojčíslí udává třídu norem, druhé dvojčíslí skupinu norem ve třídě norem a poslední stanovuje číslo ve skupině norem. Za číselným označením je obvykle uvedeno chemické složení. Norma DIN využívá klasické značení materiálu pouze číselným kódem. První číslo udává daný druh materiálu (hliník má číslovku 3). Následuje tečka, po které se uvádí číslo skupiny materiálu a pořadové číslo materiálu [22]; [23]

Tab. 4-2 Značení hliníkové slitiny dle norem [24]

EN 573-3		ČSN		DIN 1725-1	
Číselné	Chemické	Číselné	Chemické	Číselné	Chemické
EN AW 7075	EN AW-AlZn5,5MgCu	ČSN 42 4222	AlZn6Mg2Cu	3.4365	AlZn5,5MgCu1,5

4.1.3 Práškový materiál

Prášek byl zakoupen u anglické firmy *LPW technology*, která daný práškový materiál dodává s označením LPW-7075-5. Je vyroben pomocí atomizace plynem, kdy je tavenina rozstříkována proudem inertního plynu. Výsledný prášek má velice vysokou kvalitu sférických částic. Výrobce udává velikost částic v rozmezí mezi 20-63 μm . Při manipulaci s ním se projevila jeho velmi dobrá „tekutost“. Pořízena byla dvě balení, každé o hmotnosti 5 kg.



Obr. 4-2 Prášek hliníkové slitiny AlZn5,5MgCu

4.2 Výrobní zařízení

K výrobě technologií SLM je využito zařízení SLM 280^{HL} (obr. 4-3) umístěné v laboratoři Ústavu konstruování. Výrobce stroje je německá firma *SLM Solutions Group AG* sídlící v Lübecku, která patří mezi jedny z nejlepších a celosvětově nejznámější výrobců „3D tiskáren“ zpracovávající kovový prášek.



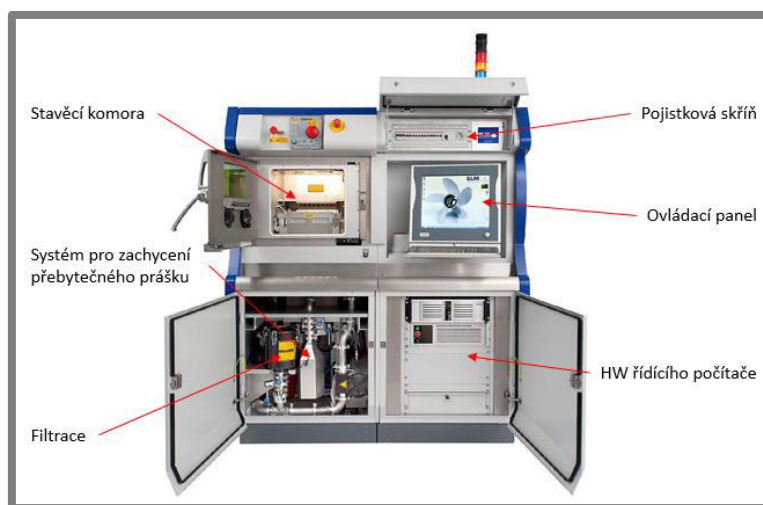
Obr. 4-3 Zařízení SLM 280^{HL} [25]

Výrobce dodává „tiskárny“ v různých provedeních, které se liší jak výkonem, tak množstvím laserových hlav. Všechny modifikace jsou opatřeny vláknovými IPG lasery a mohou být v konfiguraci single (samostatná laserová hlava), twin (dvojice laserových hlav se stejným výkonem paprsku), nebo dual (dvojice laserových hlav s různým výkonem paprsku). Zařízení, nachází se na Ústavu konstruování, je vybaveno „single“ laserem s maximálním výkonem 400 W. Technické specifikace jsou uvedeny v tabulce 4-3.

Tab. 4-3 Technické parametry SLM 280^{HL} [25]

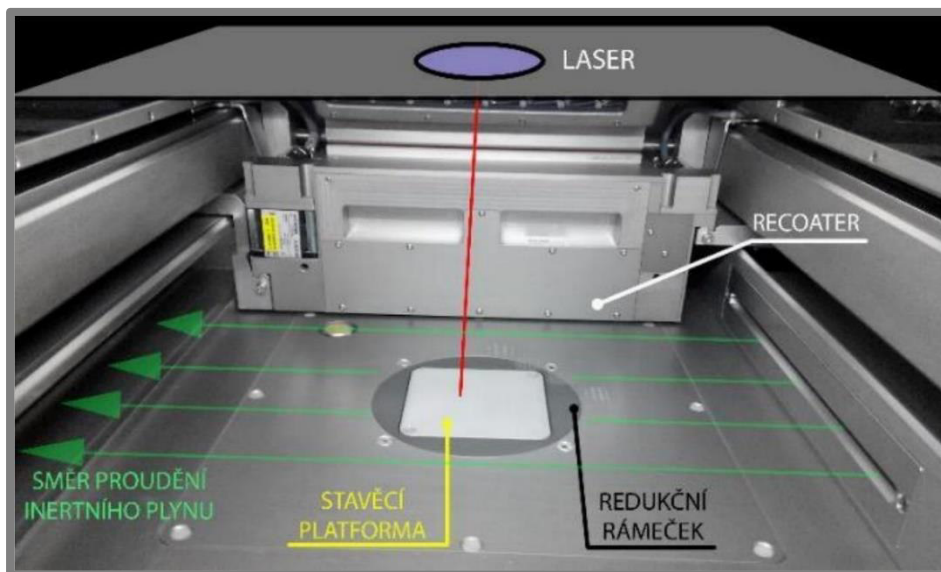
Stavební prostor (X, Y, Z)	280 x 280 x 365	[mm]
Produktivita	Až 55	[cm ³ /h]
Tloušťka vrstvy	20-75	[μm]
Průměr ohniska svazku	80-115	[μm]
Max. skenovací rychlost	10	[m/s]
Průměrná spotřeba plynu při stavbě (Ar/N ₂)	2,5	[l/min]
Průměrná spotřeba plynu při pročišťování (Ar/N ₂)	70	[l/min]
Příkon	3,5 - 5,5	[kW]
Hlavní rozměry (D x Š x V)	3050 x 1050 x 2850	[mm]
Hmotnost	1500	[kg]

Zařízení SLM 280^{HL} lze pomyslně rozdělit na několik hlavních částí, které jsou uvedeny na obrázku 4-4. Jednou z nejdůležitějších částí stroje pro samotný tisk je stavěcí komora. Ta je umístěna v levé horní části stroje. Pod ní je umístěno potrubí s nádobou na zachycení přebytečného prášku a filtrační zařízení. Pravá část tiskárny zahrnuje počítač, který ovládá celé zařízení a zdroj laseru. Ve spodní části je umístěn hardware samotného počítače. V úrovni stavěcí komory se nachází ovládací panel s klávesnicí a nad ním pojistková skříň. Poslední důležitou částí je zásobník na práškový materiál, který je v zadní části zařízení za stavěcí komorou. K zajištění potřebné atmosféry uvnitř komory je využíván kompresor a tlaková láhev s inertním plynem. Zařízení na Ústavu konstruování je navíc vybaveno generátorem dusíku (N₂), který nahrazuje tlakové láhve tohoto plynu.



Obr. 4-4 Popis zařízení SLM 280^{HL} [26]

Výroba součástí technologií SLM probíhá výhradně ve stavěcí komoře, která je popsána na obrázku 4-5. Součásti jsou postupně vypalovány laserem na stavěcí platformě, která po vypálení tvaru součásti v jedné vrstvě klesá právě o výšku jedné vrstvy. Lze si vybrat mezi standardní stavěcí platformou (280x280 mm), nebo „malou“ platformou (98x98 mm) s redukčním rámečkem a posuvným válcem. Nanesení vrstvy prášku zajišťuje recoater konající lineární vratný pohyb. Prášek je do recoatru dopravován ze zásobníku a přebytečný prášek po nanesení vrstvy padá skrze přepady do systému pro jeho sběr. Přímě nad stavěcí platformou je umístěno „okénko“, kudy prochází paprsek vláknového laseru. K odvodu spalin a nečistot, vznikajících při procesu tavení prášku, slouží proud inertního plynu proudícím těsně nad platformou. Z důvodu nutnosti záznamu tisku a kontroly kvality nanesení jednotlivých vrstev je komora vybavena i fotoaparátem a kamerou.



Obr. 4-5 Popis stavěcí komory [24]

4.3 Experiment

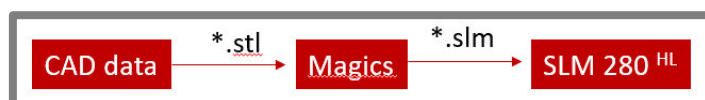
4.3

Postup experimentálního hledání optimálních procesních parametrů, pro zpracování hliníkové slitiny EN AW 7075 technologií SLM, vychází ze současného stavu poznání v předchozí kapitole. Standardně bývá prvním krokem tvorba a analýza liniových vzorků neboli zkoumání parametrů skenovací rychlosti a výkonu laseru pro jednotlivé návary. Úskalím výroby liniových vzorků spočívá v nanesení přesné a rovnoměrné vrstvy prášku. Na počátku řešení diplomové práce nebylo zařízení nanášení přesných vrstev k dispozici, proto bylo přistoupeno rovnou k tvorbě objemových vzorků. Stejně jako u liniových vzorků lze zkoumat parametry výkonu laseru i skenovací rychlosti, navíc je u objemových vzorků zkoumána vzdálenost mezi jednotlivými drahami laseru. Hlavním zkoumaným parametrem objemových vzorků je porozita.

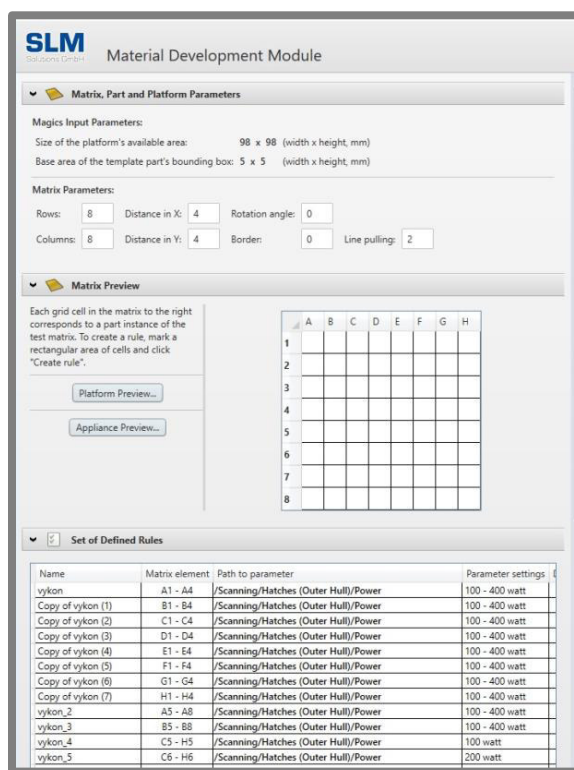
4.3.1 Příprava experimentu

4.3.1

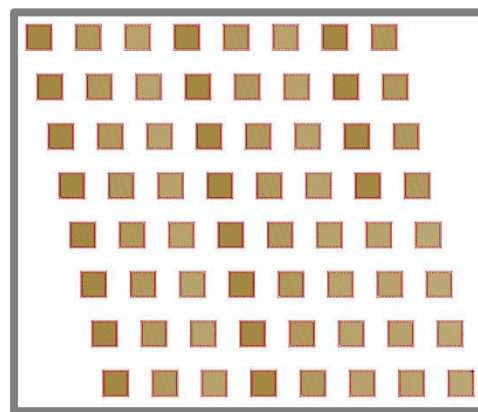
Vstupní data, dle kterých je řízen proces výroby SLM, neboli preprocessing, byla připravována v programu Materialise Magics. Tento software umožňuje tvorbu základních těles, nebo nahrání modelu ve formátu *.stl. Lze v něm opravit chyby „*stl sítě“ nahraného dílu, editovat model, generovat podpůrné struktury a určit polohu součásti na stavěcí platformě. O komunikaci mezi softwarem a strojem se stará tzv. „build processor“ (volně přeloženo do češtiny: stavební procesor), který přiřadí součásti požadované výrobní parametry. Tento build processor je integrovaný v softwaru Magics. Po nastavení všech požadovaných parametrů je vygenerován soubor ve formátu *.slm, který je podporovaný zařízením SLM 280^{HL}. Zjednodušený postup v přípravě dat je znázorněn na obrázku 4-6.



Obr. 4-6 Zpracování dat pro výrobu SLM



Obr. 4-8 Material Development Modul



Obr. 4-9 Pravidelné pole vzorků

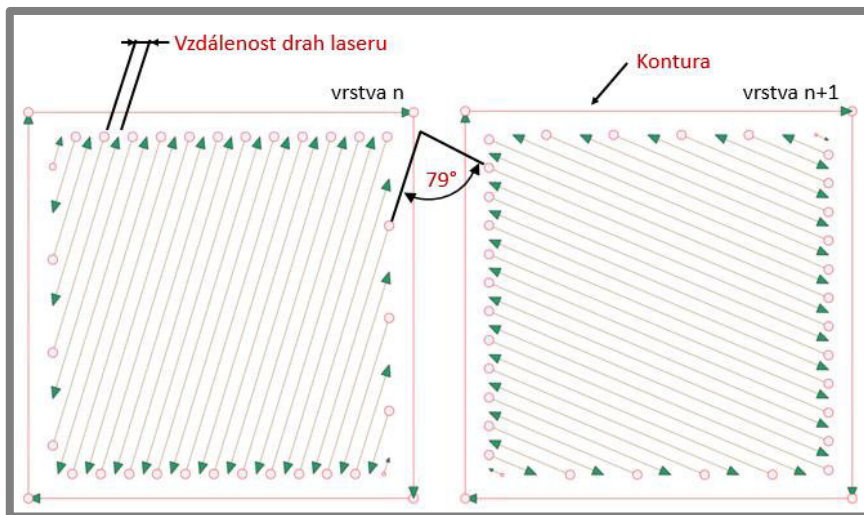
Vzorky byly u všech testů rozprostřeny na platformu s ohledem na hodnoty objemové hustoty energie. Jedná se o poměr výkonu laseru a skenovací rychlosti, vzdálenosti drah laseru a výšce vrstvy. Objemová hustota energie slouží k lepšímu porovnání vlivu závislých parametrů na výslednou kvalitu a porozitu vzorků. V mnoha publikacích ji autoři považují za klíčový faktor ovlivňující vlastnosti vyrobených dílů. Vzorky s nejvyšší hodnotou této energie jsou situovány na levou stranu platformy neboli nejbližší k výstupu proudění inertního plynu (viz. Obr.4-5). Naopak vzorky s nejnižší vstupní energií se umísťují na opačnou stranu. Důvodem je vznik většího množství spalin u vzorku s vyšší objemovou hustotou energií, které jsou strhávány proudem inertního plynu a mohly by ovlivnit kvalitu ostatních vzorků ve směru tohoto proudění.

$$E = \frac{P_L}{v_s * h * H} \quad (1)$$

Kde:

E	J/mm ³	je objemová hustota energie
P_L	W	- výkon laseru
v_s	mm/s	- skenovací rychlost
h	Mm	- tloušťka vrstvy
H	Mm	- vzdálenost drah laseru

Pro výrobu objemových vzorků se použila obousměrná skenovací strategie (meandr) s pootáčením vrstev o 79° (viz Obr. 4-10). Tato strategie bývá standardně používána pro experimentální určení porozity. Dále jsou u všech testovaných kostek zachovány procesní parametry kontury z důvodu zachování celistvosti vzorku. Výkon laseru byl pro kontury stanoven na 350 W a skenovací rychlost na 450 mm/s. Tyto parametry jsou odladěny na zařízení SLM 280^{HL} pro standardní hliníkový materiál. Vyhodnocována tedy byla pouze struktura uvnitř vzorku, nikoliv kontura. Tloušťka vrstvy byla u všech experimentů stanovena na 50 μm , která odpovídá rozložení velikosti částic deklarované výrobcem.



Obr. 4-10 Obousměrná skenovací strategie s pootáčením o 79°

4.3.2 Příprava zařízení

Důležitým vstupním krokem je důkladné vyčištění stroje SLM 280^{HL}. Na tomto zařízení je experimentálně zkoumáno více kovových materiálů. Proto, je nutné očistit všechny plochy, které se dostávají v průběhu stavby součástí do kontaktu s kovovým práškem. Mohlo by totiž dojít ke kontaminaci materiálu práškem z předchozí stavby, a tudíž k ovlivnění výsledků experimentu.

Výrobou na standardní platformě dochází k velké spotřebě práškového materiálu. Pro výzkum je množství prášku omezeno, a proto při výrobě menšího množství vzorků je vhodné využít „malou“ platformu a tím snížit jeho spotřebu.

Po výběru a namontování dané stavěcí platformy je nutné její vyrovnaní a kalibrace nulové polohy. Kontrola spočívá v zarovnání platformy na úroveň okolního rámečku pomocí rovného břítu. Břit je přikládán na rámeček kolem platformy a je sledována mezera mezi břitem a platformou, dokud nedojde k její zarovnání. Aby byly jednotlivé nanášené vrstvy přesné je zapotřebí vyměnit stírací břit recoateru a pečlivě ho vyrovnat vzhledem ke stavěcí platformě. V poslední řadě se očistí sklíčko laseru speciálním hadříkem navlhčený sprejem taktéž určeným speciálně pro čištění laserového sklíčka. Protože se jedná o experimentální práci je nutné tyto úkony provádět před každou stavbou.

Proces výroby probíhá v uzavřené stavěcí komoře s inertní atmosférou. Uvnitř komory se vytvoří potřebný přetlak a sníží se obsah kyslíku přivedením dusíku nebo argonu pod hodnotu 0,2 %. První vrstva se nanáší postupným vysypáním a roztíráním daného množství prášku z recoateru, dokud není ideálně zakryta celá platforma.

Množství vysypaného prášku se zadává v softwaru zařízení „manuálně“ a kontrola první vrstvy se provádí pouze vizuálně s pomocí pořízené fotky kamerou. První vrstva je vždy skenována laserem 2x pomocí funkce Initial exposure z důvodu lepšího spojení se stavěcí platformou.

Teplota „malé“ platformy

Na Ústavu konstruování je na zařízení SLM 280^{HL} standardně používaný materiál s odladěnými procesními parametry AlSi10Mg. Pro tento materiál se používá teplota výhřevu platformy 120 °C. Pro první testy byla tato teplota volena jako referenční i pro výrobu vzorků z hliníkové slitiny 7075. Senzory teploty jsou umístěny v upínací desce. Při použití „malé“ stavěcí platformy se na upínací desku uchytí posuvný válec. Dále mezi posuvným válcem a redukčním rámečkem je vzduchová mezera. Z těchto důvodů dochází ke ztrátám při přenosu tepla z výhřevného elementu. Experimentálně byla změřena teplota a bylo zjištěno, že teplota platformy v tomto případě dosahuje 80 °C, nikoliv 120 °C. [27]

4.3.3 Příprava práškového materiálu

Prášek byl před každou stavbou zbaven přebytečné vlhkosti. Vlhkost způsobuje komplikace při nanášení vrstev i samotnou dopravu prášku trubkami a dávkovacími zařízeními. Dále může vytvářet obtíže „zalepováním“ čidel kontrolující zásobu prášku. Práškový materiál byl sušen při teplotě 70 °C po dobu 3 hodin nebo na 40-50 °C po dobu 10 hodin.

4.3.3

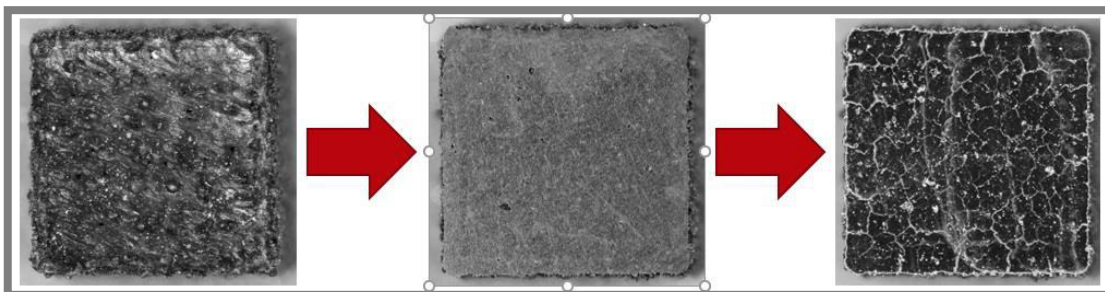
4.4 Hodnocení experimentu

4.4

4.4.1 Příprava vzorků

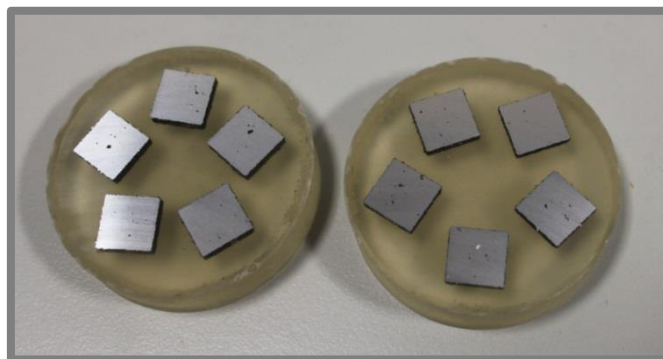
4.4.1

Zhotovené vzorky bylo nutné před samotnou analýzou připravit. Příprava spočívala ve vytvoření výbrusů pomocí mokrého broušení na metalografické brusce. Broušení se může zdát jako dostačující, ale v průběhu vyhodnocování bylo zjištěno, že dochází k „zanášení“ trhlin a menších pórů. Tyto vady následně nebyly na snímcích patrné. (viz. Obr 4-11). Bylo tedy přistoupeno k následnému vyleštění vzorků pomocí leštícího kotouče a diamantové pasty. Po leštění již je patrna většina trhlin i pórů uvnitř vzorku.



Obr. 4-11 Postup vyhodnocování vzorků: 1) původní vzorek; 2) broušený vzorek; 3) vyleštěný vzorek

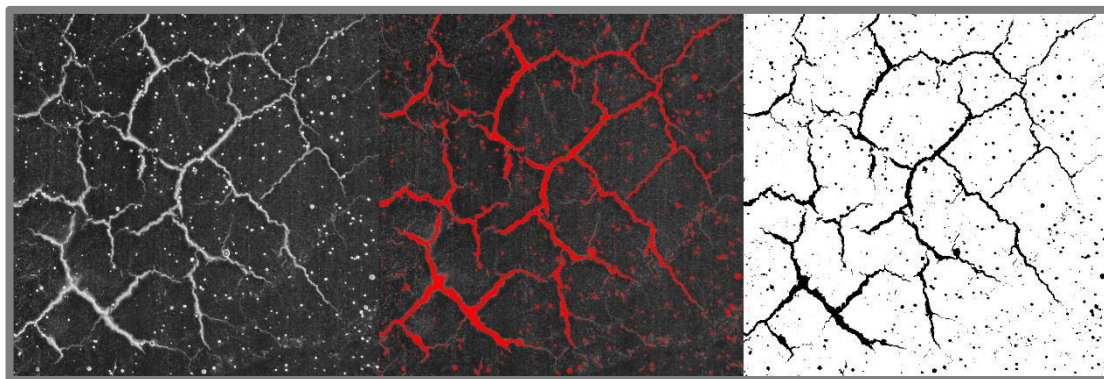
Pro urychlení zpracování vzorků probíhalo broušení a leštění přímo na „malé“ platformě. Pokud se experiment provedl na „velké“ platformě byly vzorky odřezány pomocí vibrační pily z platformy a zality do akrylátové hmoty (viz. Obr. 4-12). K tomu se využilo dvousložkového materiálu Durakryl od firmy Spofa Dental.



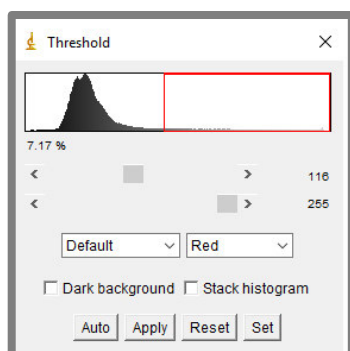
Obr. 4-12 Vzorky zalité do akrylátových puků

4.4.2 Určení porozity

Připravené vzorky byly nafoceny optickým mikroskopem OLYMPUS SZX7 ovládaným programem QuickPHOTO MICRO. Pořízené snímky se následně vyhodnotily obrazovou analýzou v programu ImageJ, který umožňuje určit porozitu přímo z fotografie. Nahráný snímek je v první řadě převeden na osmibitový formát. Kontura u všech vzorků byla vyráběna standartními parametry, proto se vždy vybrala pouze oblast šrafování laseru (zkoumaná oblast). Proces postupné úpravy fotky je vidět na obrázku 4-13. Pomocí funkce Treshold (viz. Obr.4-14) je buď uživatelem, nebo automaticky detekována porozita. Detekce porozity je v případě „manuálního“ výběru velmi citlivá a při opakování analýzy stejného snímku může dojít k rozdílu hodnot porozity až 0,5 %. Výsledky se generují do přehledné tabulky (viz Obr. 4-15). Po vyleštění vzorků vstupuje do analýzy i plocha trhlin (viz. Obr. 4-13). Proto vykazují vysokou porozitu i vzorky, které obsahují pouze trhliny. S ohledem na charakter výsledků nelze určit, zdali je struktura materiálu tvořena z větší části póry nebo trhlínami. Proto je v této diplomové práci převážně použita relativní hustota vzorků. Trhlina uvnitř materiálu má větší dopad na zhoršení mechanických vlastností nežli vzniklý pór.



Obr. 4-13 Postup úpravy obrázku v programu ImageJ



Obr. 4-14 Funkce threshold

Results						
File	Edit	Font	Results			
	Area	Mean	Min	Max	%Area	
1	5875776	19.099	0	255	7.490	

Obr. 4-15 Tabulka výsledků obrazové analýzy

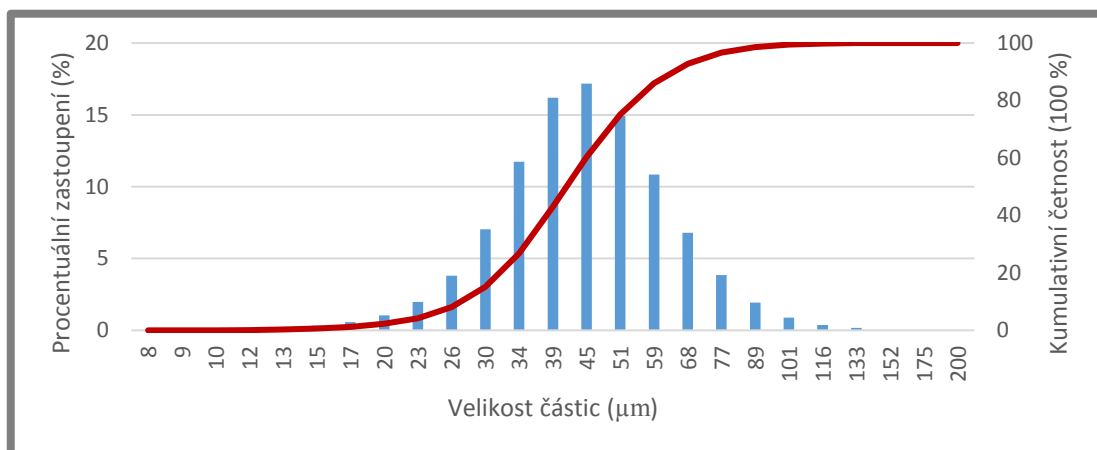
5 VÝSLEDKY

5.1 Analýza prášku

Technologie SLM zpracovává práškový materiál s kulovými částicemi. Jedním z důležitých parametrů kovového prášku je jeho distribuce a velikost částic. Chemické složení prášku je certifikováno výrobcem a je uvedeno v příloze 7.

5.1.1 Distribuce částic

Práškový materiál je dodáván s protokolem o měření velikosti a distribuci částic (příloha 8). Dříve byly zjištěny problémy, kdy prášek neodpovídal deklarovaným hodnotám od výrobce, proto bylo provedeno kontrolní měření. To bylo provedeno na přístroji Horiba LA 950 využívající k měření laserovou difrakci. Laserový paprsek je zaměřen na částice prášku. Dle intenzity a úhlu rozptylu odraženého paprsku od povrchu částice je určena velikost této částice. Měření je prováděno na statistickém vzorku, není tedy měřen celý objem používaného prášku. Výsledky jsou vyneseny do grafu na obrázku 5-1, kde je znázorněna kumulativní křivka a procentuální zastoupení dané velikosti částic.



Obr. 5-1 Sloupkový graf distribuce velikosti částic s kumulativní četností

Měření distribuce částic výrobce provedl na třech vzorcích prášku. K měření bylo využito rovněž laserové difrakce, ale bylo provedeno na přístroji Malvern Mastersizer 3000. Přehled výsledků je v tabulce 5-1, kde lze hodnoty měření výrobce porovnat s měřeními na stroji Horiba LA 950.

Tab. 5-1 tabulka velikostí částic

	D10 (μm)	D50 (μm)	D90 (μm)
Horiba LA 950	27,1	41,4	63,9
Malvern Mastersizer 3000	26,5	41,5	63,9
	26,1	41,4	64,3
	25,9	41,3	64,2

Změřené hodnoty se od hodnot uváděnými výrobcem výrazně nelišily, což umožnilo přistoupit k výrobě experimentů.

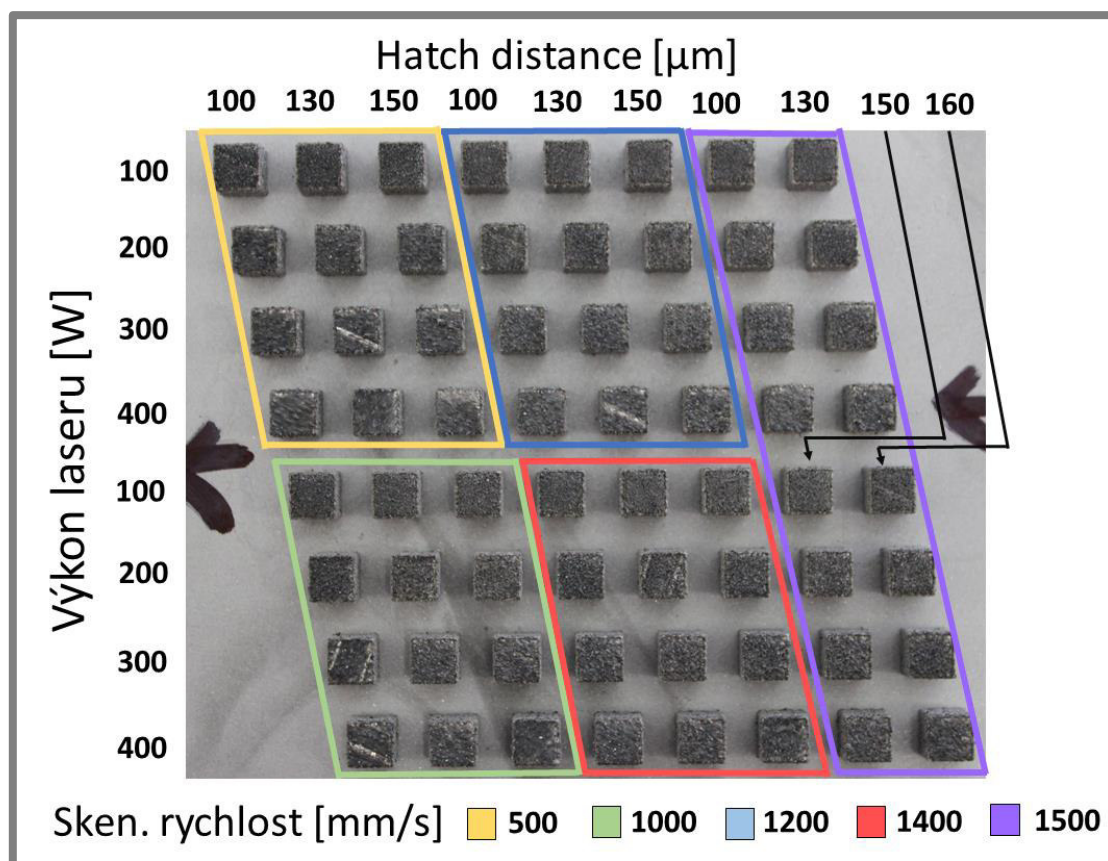
5.2 Objemové vzorky

5.2

5.2.1 Objemový test I

5.2.1

Výrobní parametry prvního testu objemových vzorků byly voleny na základě přechozí rešerše. Vybrané rozsahy parametrů jsou znázorněny na obrázku 5-2. Vzorky ve tvaru kostek (5 x 5 x 5 mm) byly rovnoměrně rozloženy na platformě do tvaru rovnoběžníku (64 vzorků). Toto rozložení je voleno s ohledem na možné poškození stíracího břitu v průběhu výroby. Poškození břitu se projeví na kvalitě nanášených vrstev. Jestliže je zvoleno rozmístění „za sebe“ vada na břitu se projeví v celé řadě. Pokud ale jsou vzorky ustaveny na platformu v rovnoběžníkovém rozložení, ovlivní vada stíracího břitu menší množství vzorků. Experiment se provedl na „malé“ platformě vyhřáté na 80 °C. Inertním plynem byl při tomto experimentu zvolen dusík (N₂), jelikož výrobní zařízení je vybaveno generátorem dusíku, který vytváří dusík z okolního vzduchu. Dusík se tedy standardně využívá pro většinu staveb na tomto výrobním zařízení. Obsah kyslíku (O₂) se uvnitř komory pohyboval v rozmezí 0,06-0,08 %.

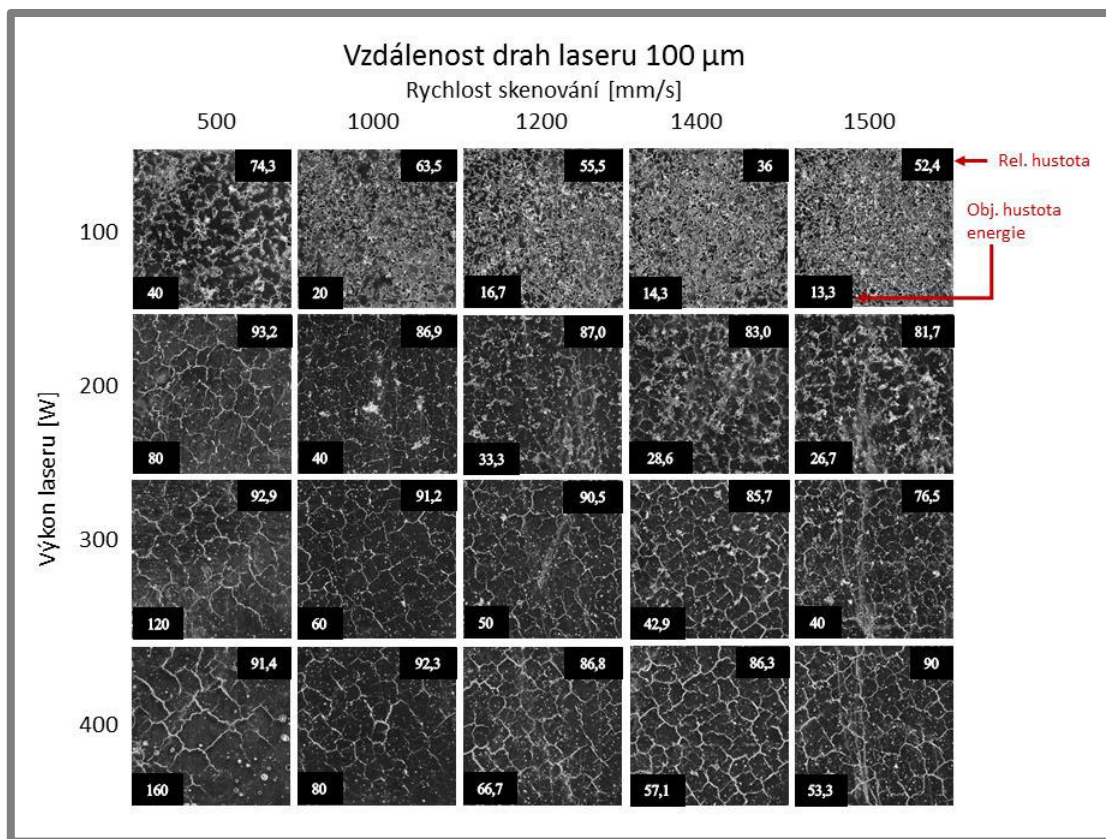


Obr. 5-2 Schematicky označené procesní parametry prvního testu objemových vzorků

Obr. 5-3 zobrazuje leštěné výbrusy objemových vzorků seřazených dle kombinace použitých výkonů a skenovacích rychlostí při dané vzdálenosti drah laseru do přehledového grafu. Přehledové grafy jsou vytvořeny pro všechny testované vzdálenosti drah laseru (příloha 2). Výjimkou je vzdálenost drah laseru 160 μm , kde kvalita vzorků byla v porovnání s ostatními výrazně horší, a proto už nebyli dále analyzováni.

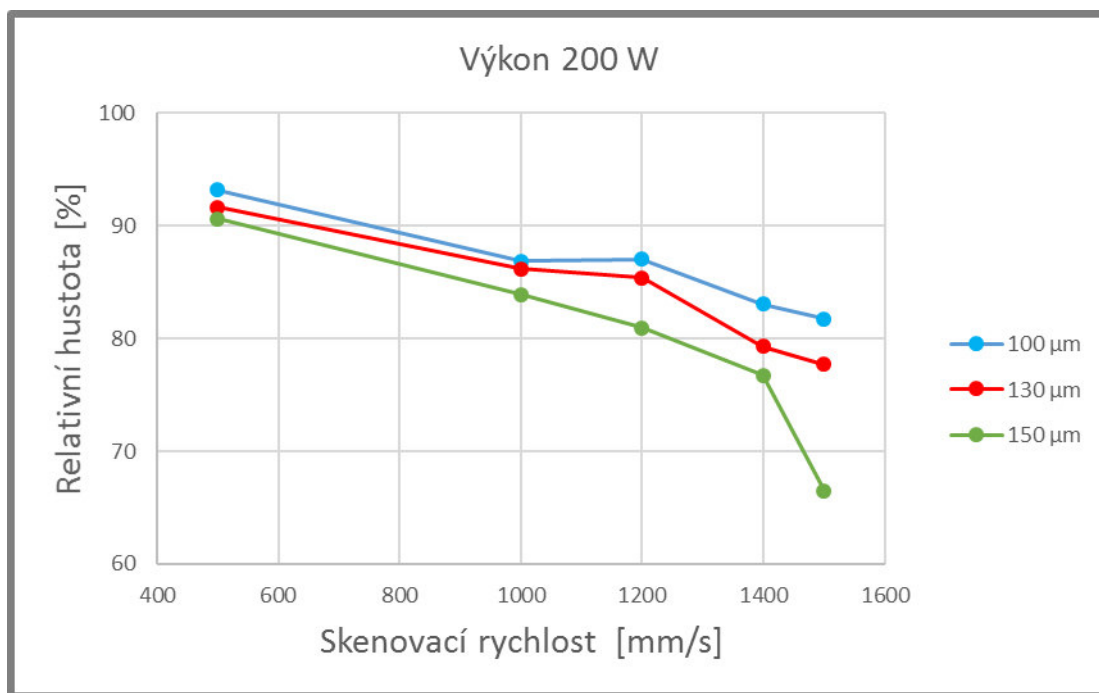
Vzorky s objemovou energií nižší než 40 J/mm^3 obsahují vyšší množství key hole pórů. U vzorku s nejvyšší energií 160 J/mm^3 se objevují metalurgické póry. V přehledu snímků na obrázku 5-3 jsou tři vzorky se stejnou objemovou hustotou energie 40 J/mm^3 a výrazně se liší v obsahu pórů. Objemová hustota energie tedy není určujícím faktorem míry pórovitosti. V celé šíři parametrů se ve struktuře vzorků objevují trhliny, které výrazně degradují mechanické vlastnosti materiálu. Ve všech případech se trhliny šíří všemi směry a utváří „sítě“ v celé ploše vzorku. U vzorků s použitým výkonem 300 a 400 W je patrný trend ubývání množství trhlín se zvyšující se objemovou hustotou energie.

Relativní hustota nejlepšího vzorku dosáhla 93,2 %. Tento vzorek obsahoval malé množství porozity, ale vyšší míru trhlín.



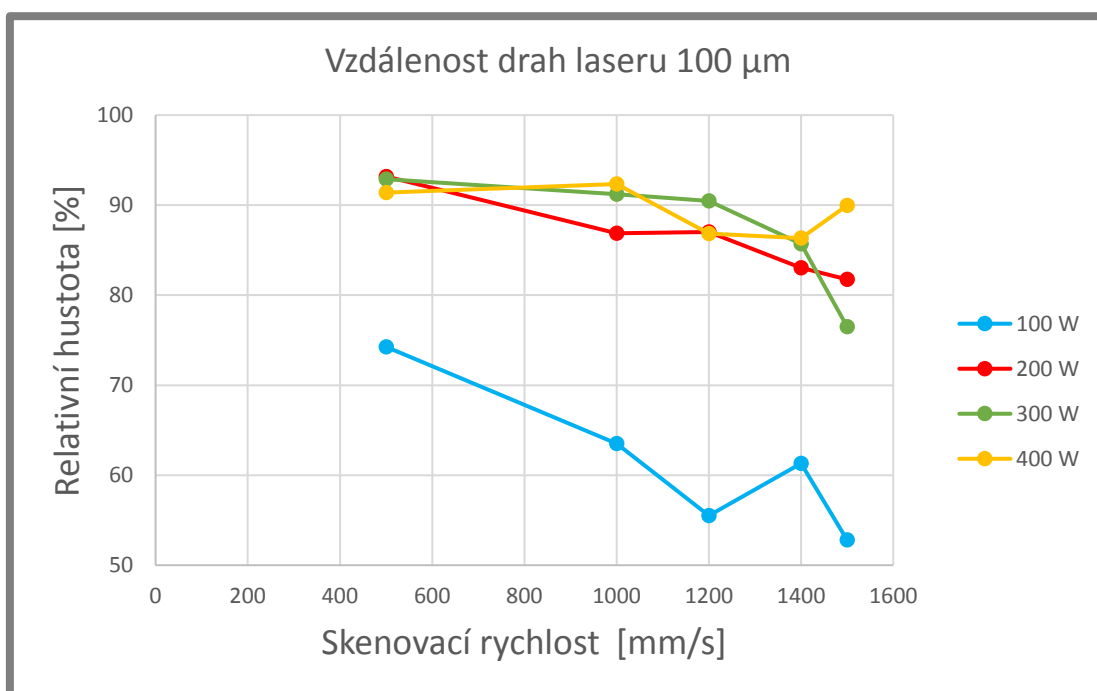
Obr. 5-3 Přehled snímků dle procesních parametrů se vzdáleností drah laseru $100 \mu\text{m}$ (test 1)

Obrázek 5-4 znázorňuje závislost relativní hustoty na skenovací rychlosti pro jednotlivé vzdálenosti drah laseru. Zřejmý je klesající trend relativní hustoty se zvyšující se skenovací rychlostí. Nejlepších výsledků z hlediska relativní hustoty je dosaženo použitím vzdálenosti drah laseru $100 \mu\text{m}$. Nejlépe je to patrné z grafu na obrázku 5-4 pro výkon laseru 200 W. Závislosti pro ostatní výkony laseru jsou v příloze 3.



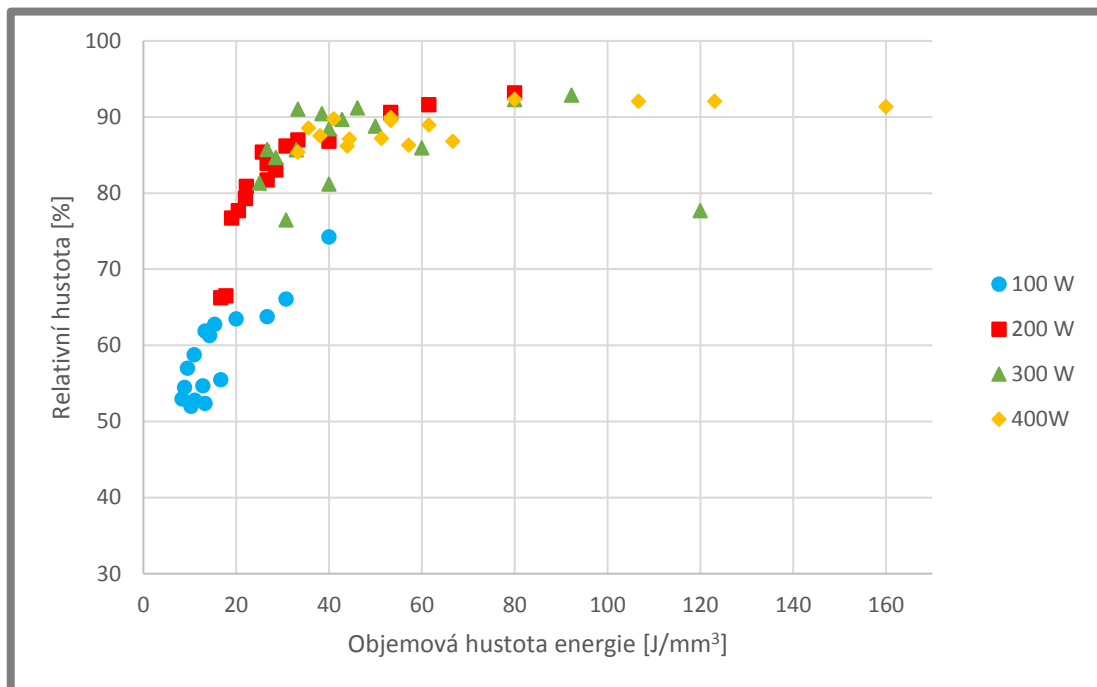
Obr. 5-4 Závislost relativní hustoty na skenovací rychlosti při konstantním výkonu laseru 200 W (test 1)

Závislosti relativní hustoty na skenovací rychlosti (viz Obr. 5-5) pro jednotlivé výkony laseru vykazují se zvyšující se skenovací rychlostí klesající tendenci. Velmi nízké hodnoty relativní hustoty oproti ostatním vykazují vzorky s výkonem laseru 100 W. Způsobeno je to nízkou hustotou objemové energie těchto vzorků, čímž došlo k nedokonalému protavení prášku. U výkonu laseru 200 W, 300 W a 400 W se relativní hustota vzorků pohybuje kolem 90 %. Nejlepších výsledků relativní hustoty pro každý výkon laseru je dosaženo při nejnižší testované skenovací rychlosti a to 500 mm/s.



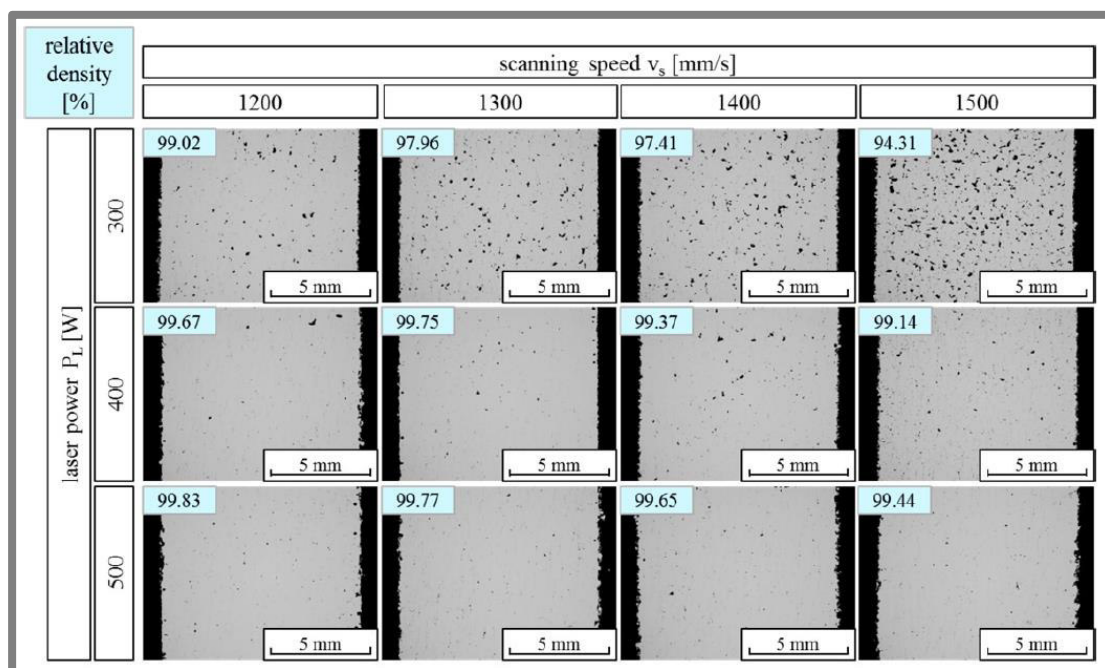
Obr. 5-5 Závislost skenovací rychlosti na relativní hustoty vzorků se vzdáleností drah laseru 100 μm (test 1)

Graf na obrázku 5-6 představuje závislost relativní hustoty na objemové hustotě energie. S rostoucí energií stoupá i relativní hustota až do 35 J/mm^3 . Od této hodnoty se relativní hustota ustálila přibližně na 90 % relativní hustoty. Bohužel ani při dalším zvyšování objemové hustoty energie nedochází k dalšímu zlepšení relativní hustoty.



Obr. 5-6 Závislost objemové hustoty energie na relativní hustoty vzorků (test 1)

V průběhu řešení této diplomové práce byla vydána publikace z německé technické univerzity v Hamburku týmem odborníků pod vedením C. Emmelmanna. Publikace je věnována zpracovatelnosti hliníkové slitiny EN AW 7075 technologií SLM. C. Emmelmann uvádí, že při použití specifického tvaru vzorku (viz Obr. 5-8) bylo dosaženo relativní hustoty přesahující 99 % (viz Obr. 5-7). U nejlepšího vzorku dokonce 99,83 %. Těchto výsledků bylo dosaženo při použití výkonu laseru 400 a 500 W a skenovací rychlost v rozmezí 1200–1500 mm/s. Poznatky z tohoto článku přispěly k tvorbě dalšího testu objemových vzorků. [28]



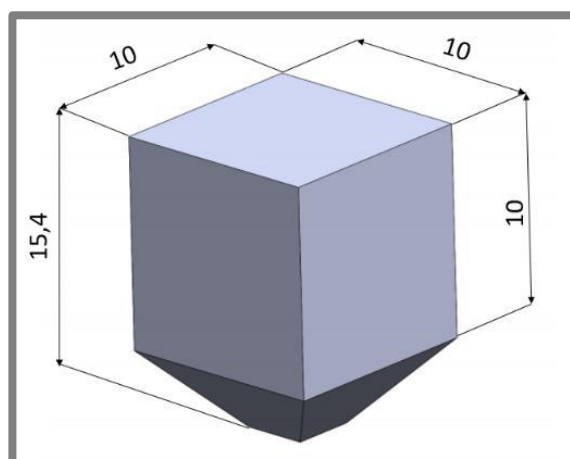
Obr. 5-7 Výbrusy vzorků seřazené dle skenovací rychlosti a výkonu laseru [25]

5.2.2 Objemový test II

5.2.2

Na základě předchozího experimentu a poznatků z odborného článku byl proveden druhý test objemových vzorků. Snížení míry obsahu pórů a trhlin se mělo dosáhnout snížením rychlosti odvodu tepla ze vzorku.

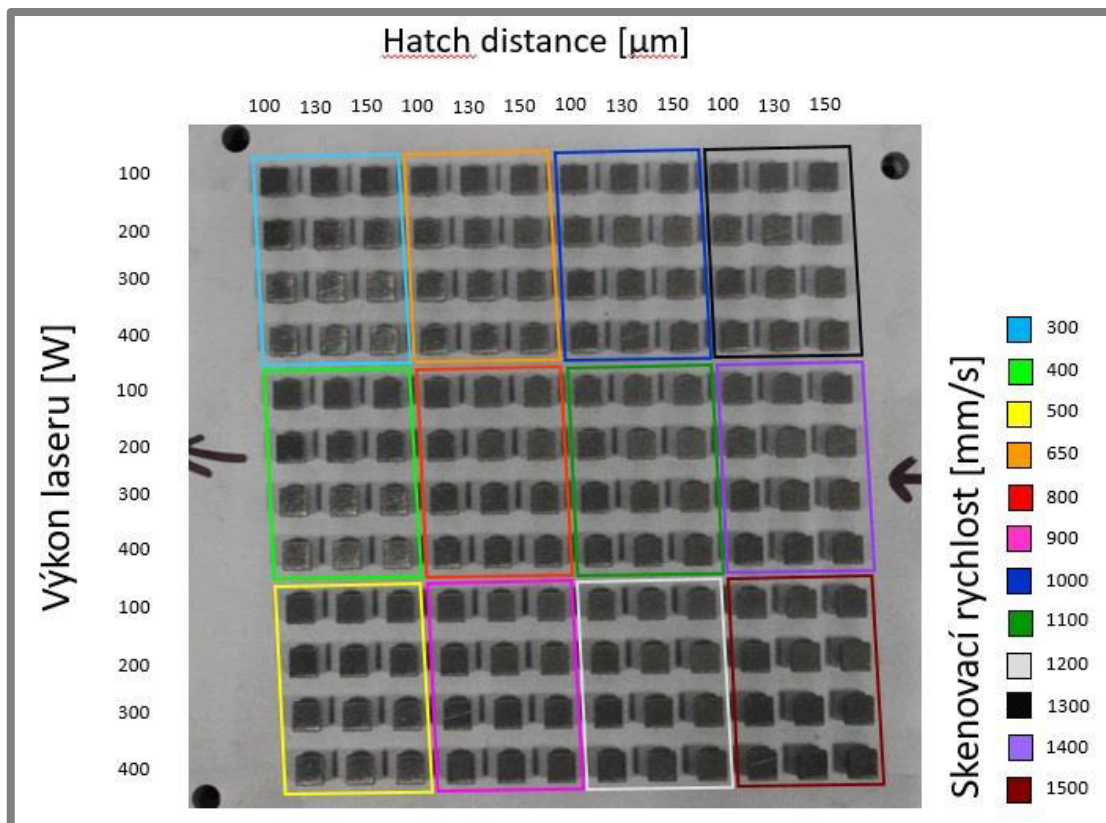
Vybrán byl tvar vzorku použitým v článku z německé univerzity v Hamburku. Jedná se o kostku o rozměrech 10x10x10 mm opatřenou na spodní části komolým jehlanem, který napomáhá snížení rychlosti tepla ze vzorku díky menší kontaktní ploše s platformou (viz Obr.5-8). Snížení gradientu chlazení roztavené lázně je docíleno výhřevem platformy na 200 °C. Požadavek výhřevu splňuje pouze „velká“ platforma se stavebním prostorem 280x280 mm.



Obr. 5-8 Tvar a základní rozměry vzorků druhé stavby

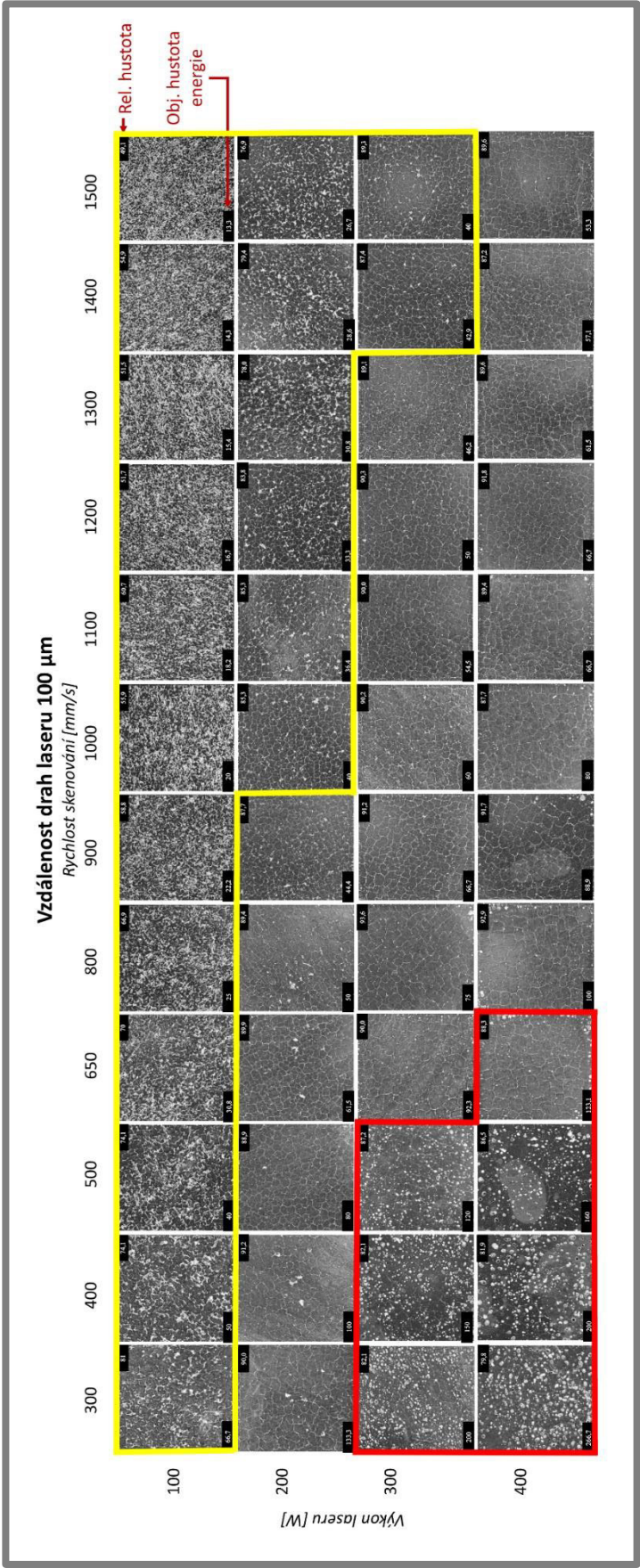
Volené parametry druhého objemového testu jsou uvedeny na obrázku 5-9. Vzorky jsou opět rozmístěny do rovnoběžníkového pole, které je ale o několik stupňů

pootočeno (144 vzorků). Důvodem je snížení opotřebení stíracího bříty. Stejně jako v článku bylo použito argonu (Ar) jako inertního plynu. Na rozdíl od dusíku bylo při využití argonu docíleno nižší hodnoty obsahu kyslíku. (čidla ukazovala 0,00 %).



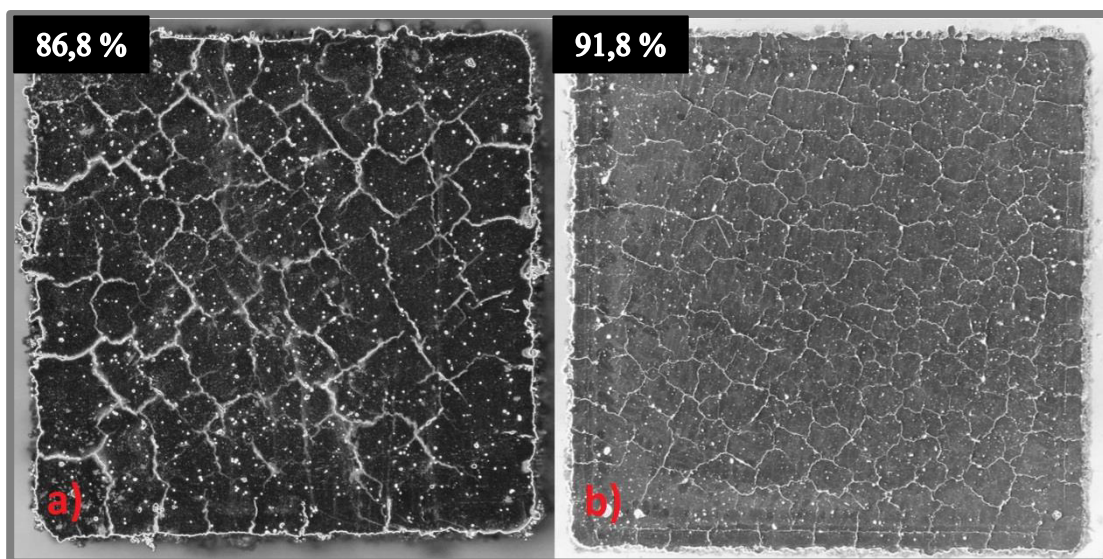
Obr. 5-9 Schematicky označené procesní parametry druhého testu objemových vzorků

Přehled snímků leštěných výbrusů se vzdáleností drah laseru 100 μm je vidět na obrázku 5-10. Pro každou vzdálenost drah laseru je vytvořen takovýto přehled (viz příloha 4). I v tomto testu se při využití nižší hustoty objemové energie než 40 J/mm^3 projeví vyšší obsah key hole pórů (označeny žlutou barvou). Naopak pokud je objemová hustota energie vyšší než 120 J/mm^3 , dochází k výskytu metalurgických pórů (oblast označena červeně). Tento jev se ale neobjevuje u vzorků s výkonem laseru 200 W. Potvrdilo se, že objemová hustota energie není určujícím faktorem míry pórovitosti. Na obrázku 5-10 je hned několik vzorků se stejnou hustotou objemové energie, které vykazují rozdílnou míru pórovitosti. Trhliny se opět objevují v celém rozsahu parametrů, a to jak u vzorků s výskytem key hole póru, tak v oblasti s vysokou mírou obsahu metalurgických pórů.



Obr. 5-10 Přehled snímků dle procesních parametrů se vzdáleností drah laseru 100 µm (test 2)

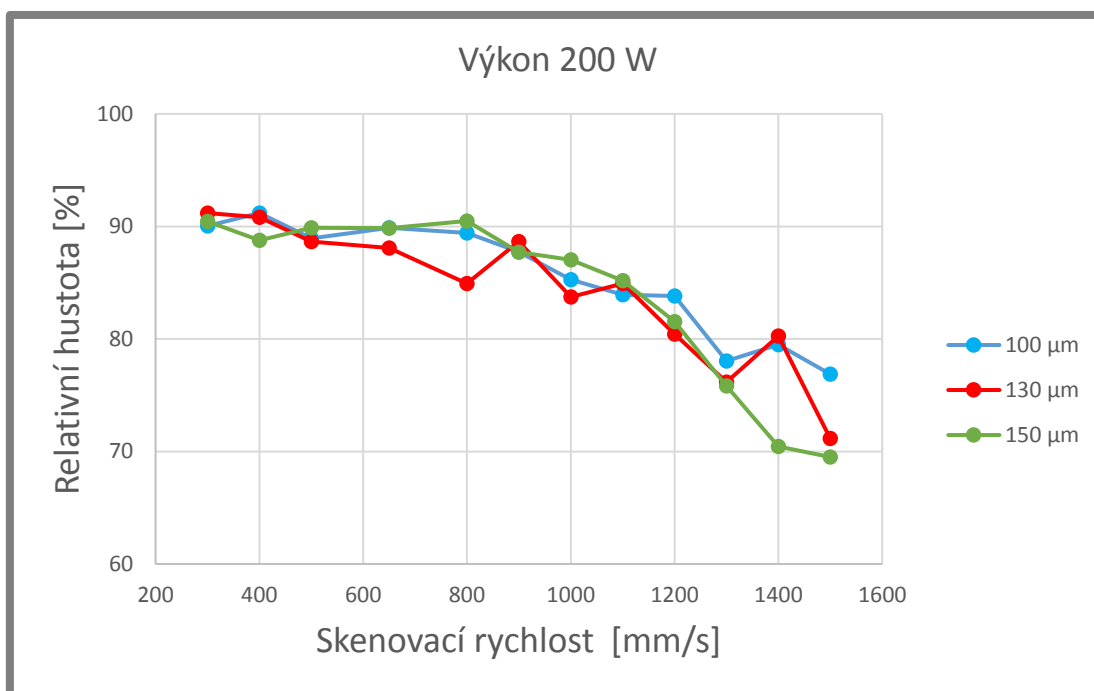
Vliv snížení rychlosti odvodu tepla se projevil sice zvýšením počtu trhlin uvnitř materiálu, ale došlo k zjemnění této sítě trhlin. Porovnání výsledků prvního a druhého experimentu je vidět na obrázku 5-11. Nedošlo ke změně šíření trhlin, v obou případech se šíří všemi směry. Výraznější rozdíl je v míře porozity. Vzorek druhého objemového testu obsahuje výrazně menší množství pórů (metalurgické póry). V tomto případě se póry objevují na rozmezí kontury a vnitřní struktury materiálu (tzv. podpovrchová porozita). Podpovrchovou porozitu lze odstranit vhodným výběrem procesních parametrů kontury. Kontura v současné době nebyla zkoumána a hlavním cílem byla snaha o odstranění trhlin. Relativní hustota vzorku se zlepšila přibližně o 5 %.



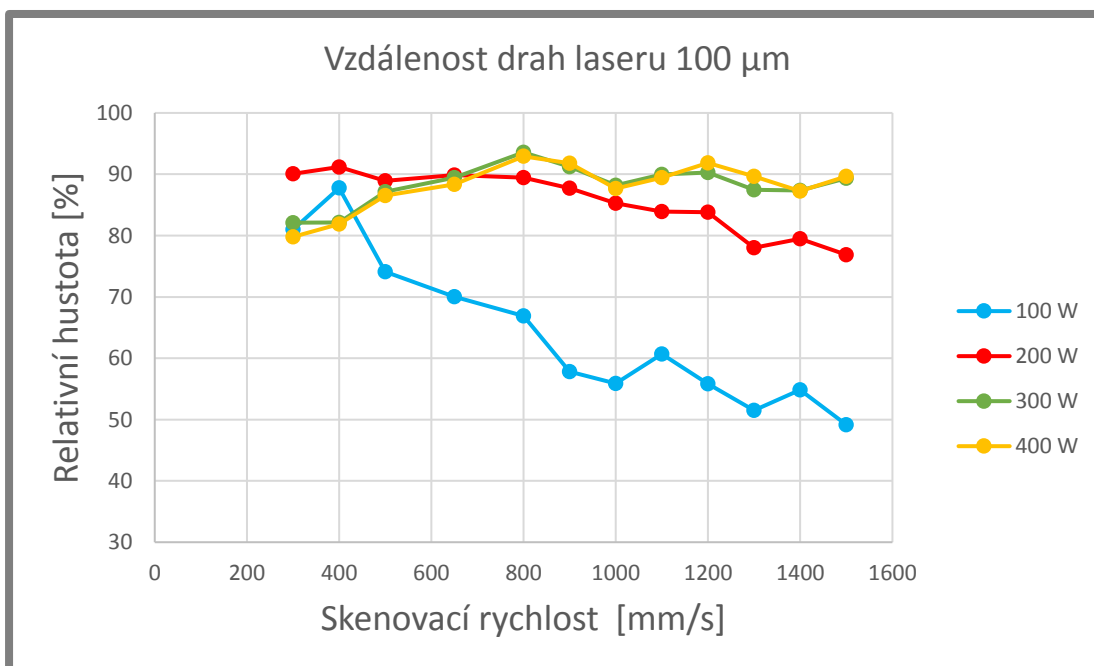
Obr. 5-11 Porovnání testů objemových vzorků, a) první experiment; b) druhý experiment

Stejně jako u předchozího experimentu byly i zde sestaveny závislosti procesních parametrů na relativní hustotě (Obr. 5-12, 5-13, 5-14).

Na obrázku 5-12 nelze z výsledků stanovit ideální vzdálenost drah laseru. Není zde pozorován zásadní vliv změny vzdálenosti drah laseru na výslednou relativní hustotu. Projevila se zde nevhodnost použití výkonu laseru 100 W (viz. Obr.5-13). Průběh křivky závislosti tohoto výkonu sice v nižších skenovacích rychlostech dosahuje relativně srovnatelných výsledků, ale se vzrůstající skenovací rychlostí výrazně klesá relativní hustota. Závislost skenovací rychlosti na relativní hustotě výkonu 200 W má mírně odlišný charakter od vyšších výkonů 300 W a 400 W. U těchto vyšších výkonů při zvyšování skenovací rychlosti do 800 mm/s narůstá relativní hustota. Ve vyšších rychlostech už bohužel nedocházelo ke zlepšení a relativní hustota se ustálila kolem 90 %. Naopak při užití výkonu 200 W má závislost se zvyšující se rychlostí klesající tendenci. Je tedy možné, že v nižších skenovacích rychlostech než 300 mm/s může dojít k nárůstu relativní hustoty.

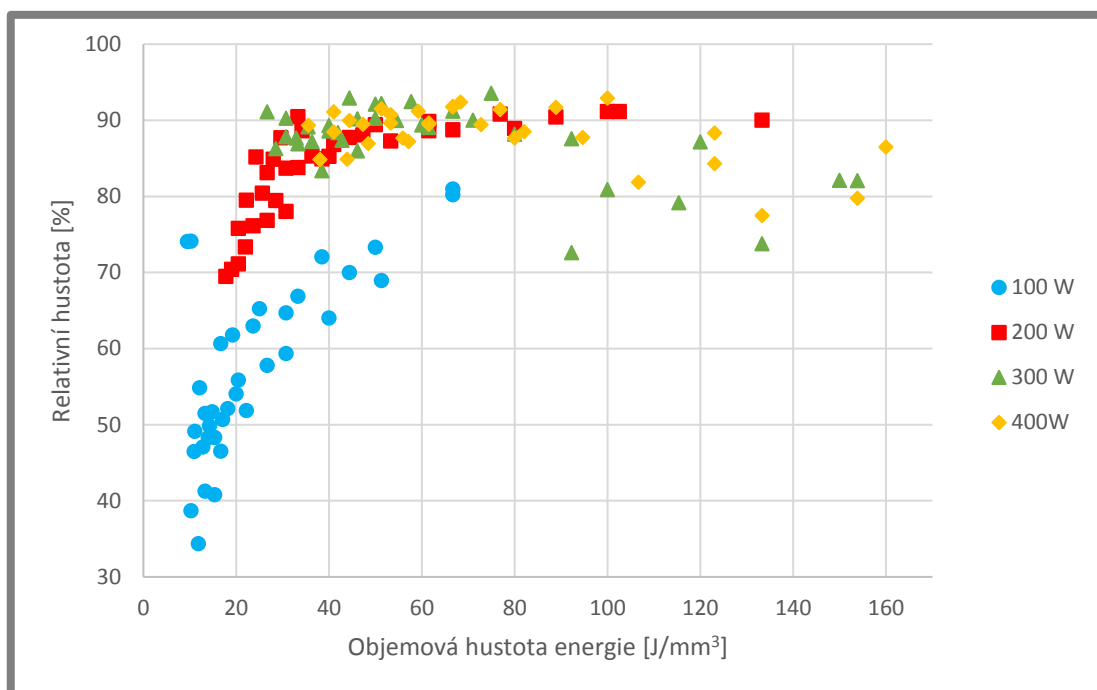


Obr. 5-12 Závislost relativní hustoty na skenovací rychlosti při konstantním výkonu laseru 200 W (test 2)



Obr. 5-13 Závislost skenovací rychlosti na relativní hustotě vzorků se vzdáleností drah laseru 100 μm (test 2)

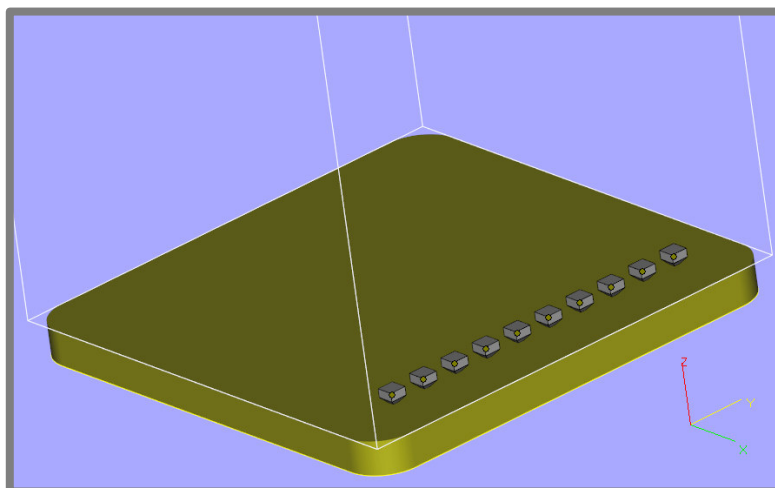
Obrázek 5-14 dokazuje nevhodnost použití výkonu laseru 100 W, jelikož při stejné hodnotě objemové hustoty energie nedosahuje srovnatelných výsledků. U ostatních výkonů laseru s rostoucí energií, do 50 J/mm^3 , se zvyšuje relativní hustota vzorku. V rozmezí $50\text{--}80 \text{ J/mm}^3$ se proces ustálil na relativní hustotě materiálu kolem 90 %. Při dalším zvyšování hodnot energie u vzorků s výkonem laseru 300 W a 400 W relativní hustota začíná klesat, ale u výkonu laseru 200 W i vzorky s vyšší energií stále vykazují relativní hustotu okolo 90 %.



Obr. 5-14 Závislost objemové hustoty energie na relativní hustoty vzorků (test 2)

5.2.3 Objemový test III

Třetí experiment objemových vzorků byl vytvořen za účelem prozkoumání oblasti s výkonem laseru 200 W a skenovací rychlosti nižší než 300 mm/s. Závislost relativní hustoty a skenovací rychlosti pro tento výkon laseru na obrázku 5-13 má pro rychlosti od 300 mm/s klesající tendenci. Oblast s nižšími skenovacími rychlostmi by mohla obsahovat vzorky s vyšší relativní hustotou než 90 %.

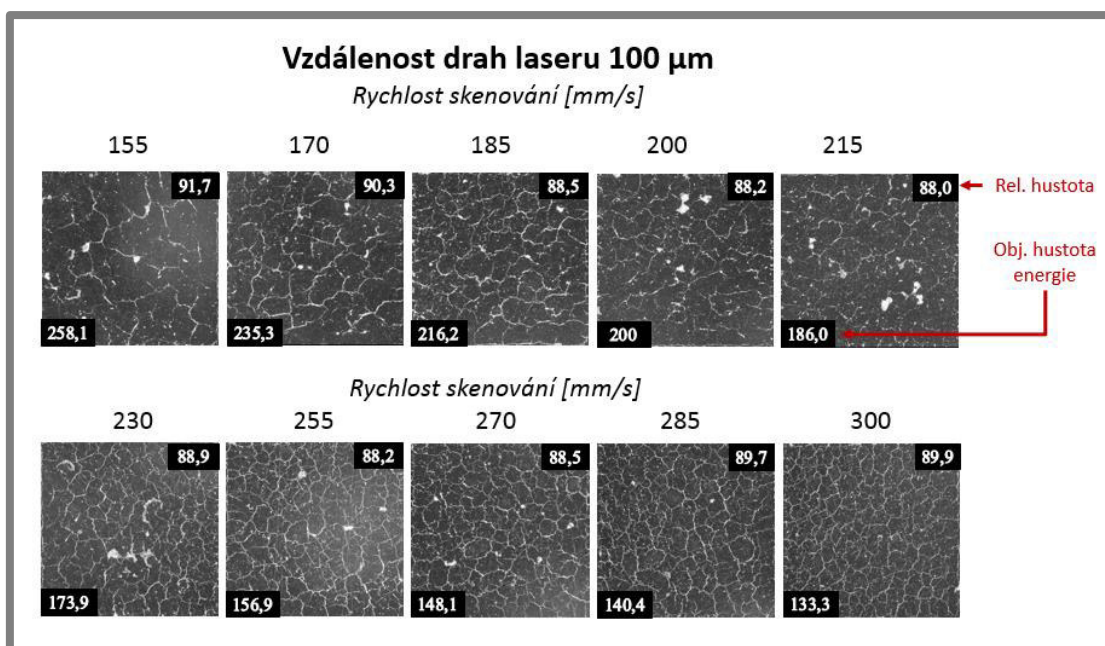


Obr. 5-15 Rozložení objemových vzorků (test 3)

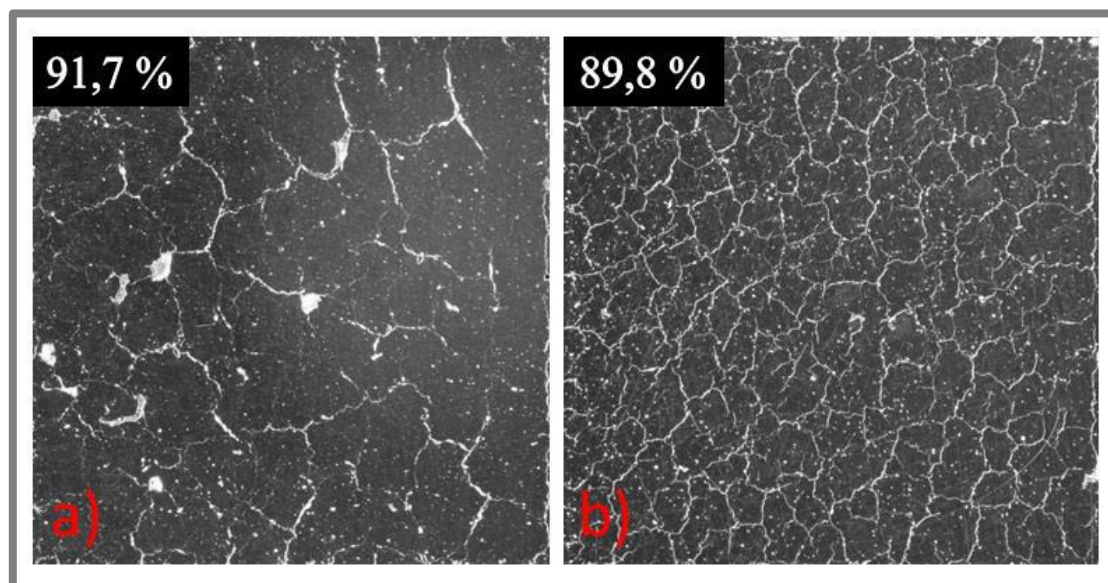
Pro dosažení teploty výhřevu platformy bylo nutné stavbu provést opět na velkou platformu 280x280 mm. Tvar objemového vzorku je totožný s předchozí stavbou (obr. 5-8). Celkem deset vzorků bylo seskupeno v jedné řadě na pravé straně platformy, tedy co nejbližší vstupu proudícího plynu z důvodu dobrého odvodu zplodin vznikajících při výrobě (viz obr. 5-15). Jediný měnící se parametr u této stavby je

skenovací rychlost. Ta byla volena v rozmezí 155-300 mm/s. Výkon laseru byl pro všechny vzorky totožný tedy 200 W, stejně jako vzdálenost drah laseru všech vzorků (100 μm). Ostatní procesní parametry zůstaly nezměněny z druhého testu objemových vzorků.

Na obrázku 5-16 jsou fotky vzorků seřazeny vzestupně dle skenovací rychlosti. Na první pohled je vidět znatelný pokles obsahu trhlín uvnitř vzorku s klesající skenovací rychlostí. Nejlepšího výsledku z hlediska obsahu trhlín tedy bylo dosaženo u vzorku s nejnižší skenovací rychlostí z celé stavby (155 mm/s). V tomto případě je relativní hustota vzorku 91,7 %.



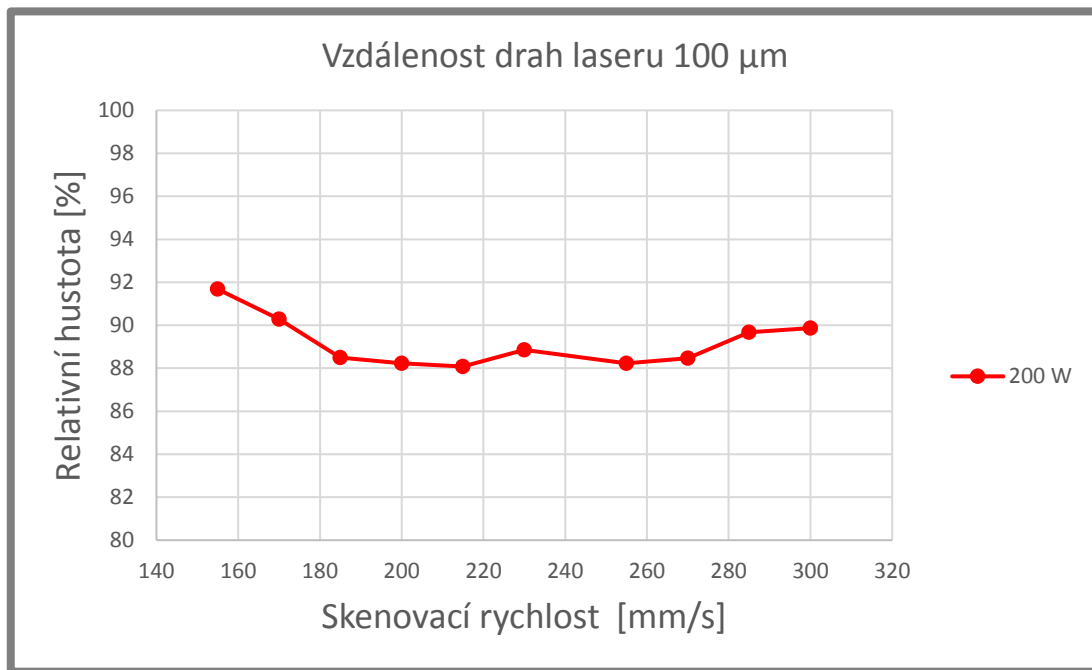
Obr. 5-16 Přehled snímků dle výkonu 200 W a skenovací rychlosti 155-300 mm/s (test 3)



Obr. 5-17 Porovnání vzorků třetí stavby: a) Skenovací rychlost 155 mm/s; b) skenovací rychlost 300 mm/s

Redukce množství trhlin dokazuje také zlepšení relativní hustoty vzorků (viz Obr.5-17). Při porovnání vzorků s nejvyšší (300 mm/s) a nejnižší (155 mm/s) skenovací rychlostí je zlepšení zhruba o 3 %. V šíření trhlin ale nenastal zásadní rozdíl, šíří se u obou vzorků všemi směry.

Graf na obrázku 5-18 ukazuje průběh závislosti skenovací rychlosti na relativní hustotě pro tento experiment. V rozsahu rychlostí 185-300 mm/s má křivka průběh takřka konstantní. Od hodnoty 185 mm/s začíná průběh, směrem k nižším rychlostem, stoupat. Tento nárůst je způsoben znatelným úbytkem trhlin uvnitř vzorků.



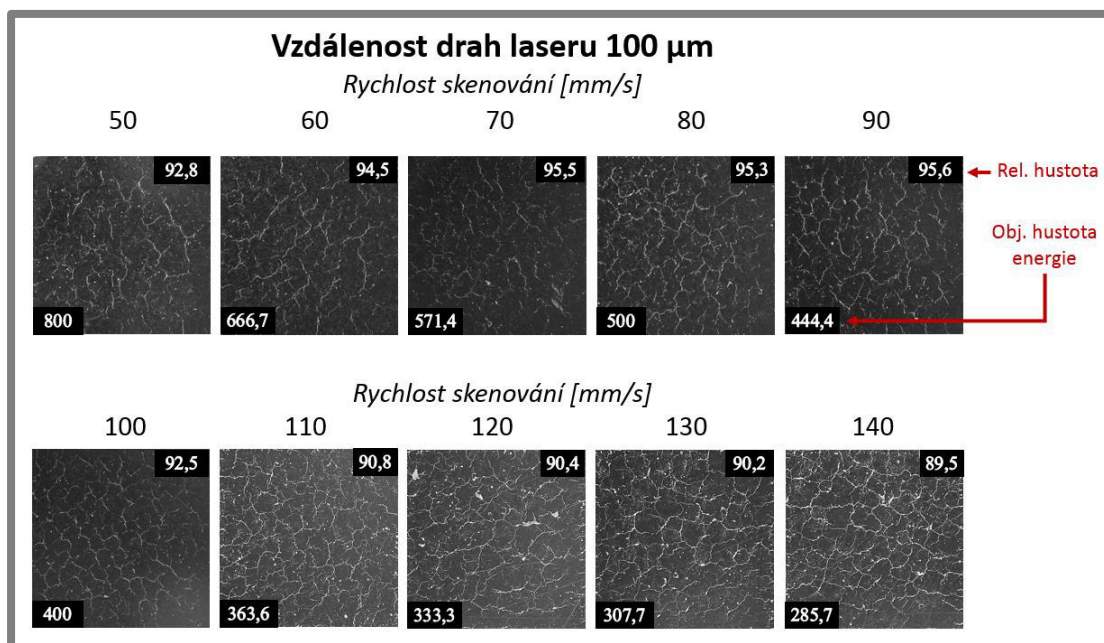
Obr. 5-18 Závislost skenovací rychlosti na relativní hustotě vzorku při použitém výkonu laseru 200 W (test 3)

Z důvodu patrného úbytku trhlin uvnitř materiálu a nárůstu relativní hustoty vzorků bylo vhodné prozkoumat oblast s ještě nižšími rychlostmi než 155 mm/s. K tomuto účelu byl proveden čtvrtý experiment objemových vzorků.

5.2.4 Objemový test IV

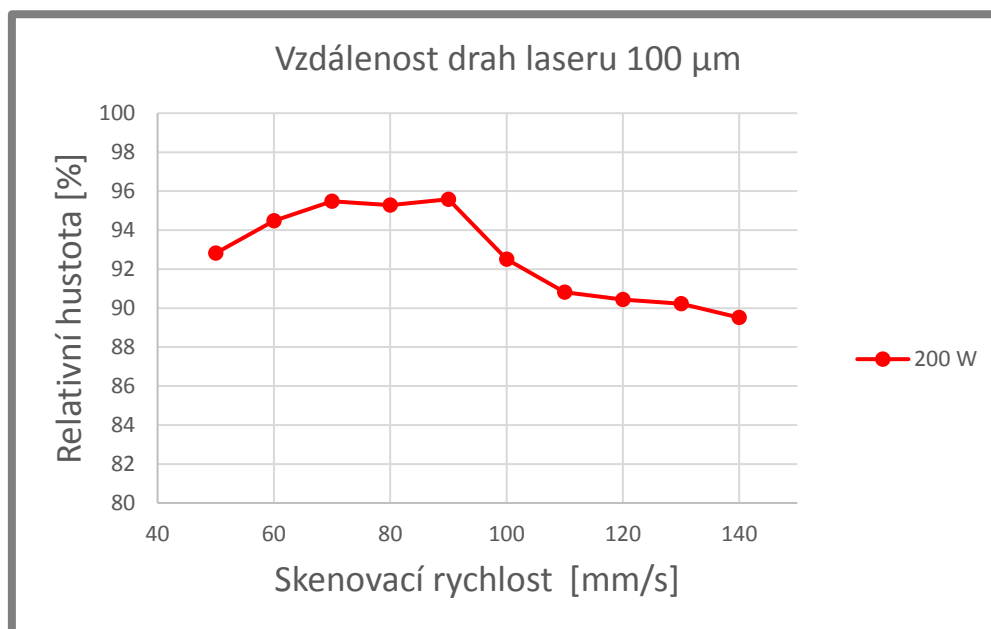
U čtvrtého testu objemových vzorků výkon laseru zůstal nezměněn, tedy 200 W. Skenovací rychlost se v tomto experimentu pohybovala v rozmezí 50-140 mm/s. Počet, tvar i rozložení vzorků odpovídal předchozí stavbě. Ostatní procesní parametry zůstaly také nezměněny.

Pořízené snímky vzorků byly opět seřazeny dle skenovací rychlosti (viz Obr. 5-19). Všechny vzorky obsahují minimální množství pórů, ale ve všech vzorcích je nemalý obsah trhlin. Nejlepších výsledků z hlediska relativní hustoty materiálu je dosaženo v rozsahu skenovacích rychlostí od 70 mm/s do 100 mm/s, kde je hustota vzorku převyšuje 95 %. U vzorků s nižší skenovací rychlostí než 70 mm/s se začínají objevovat drobné póry a zvyšuje se míra trhlin, čím snižují relativní hustotu.



Obr. 5-19 Přehled snímků dle výkonu 200 W a skenovací rychlosti 50-140 mm/s (test 4)

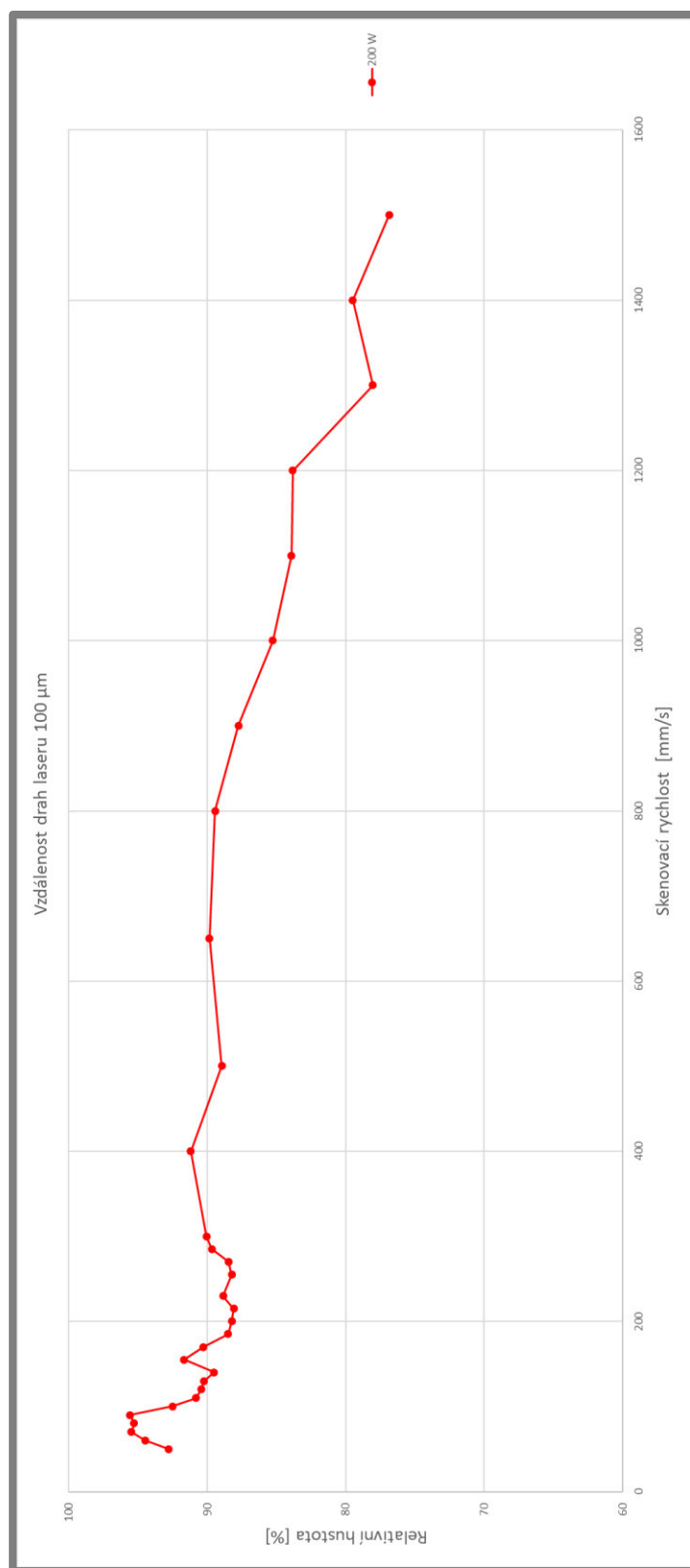
Na obrázku 5-20 je vidět průběh závislosti skenovací rychlosti na relativní hustotě pro tento experiment. Od rychlosti 50 mm/s do 70 mm/s má křivka závislosti stoupající tendenci. V rozsahu rychlosti 90-140 mm/s se stoupající rychlostí klesá relativní hustota vzorků. Průběh závislosti je ovlivněn hlavně množstvím trhlin uvnitř materiálu.



Obr. 5-20 Závislost skenovací rychlosti na relativní hustotě vzorku při použitém výkonu laseru 200 W (test 4)

Spojením závislostí pro výkon laseru 200 W ze všech třech experimentů bylo zjištěno, že maxima dosahuje tato křivka v rozmezí skenovací rychlosti 70-90 mm/s (Obr 5-21). Dále lze z křivky vyčíst, že v rozmezí rychlostí skenování 110-800 mm/s

se hodnoty relativní hustoty vzorku pohybují kolem 90 %. Při zvyšování skenovací rychlosti nad 800 mm/s začne klesat relativní hustota materiálu.

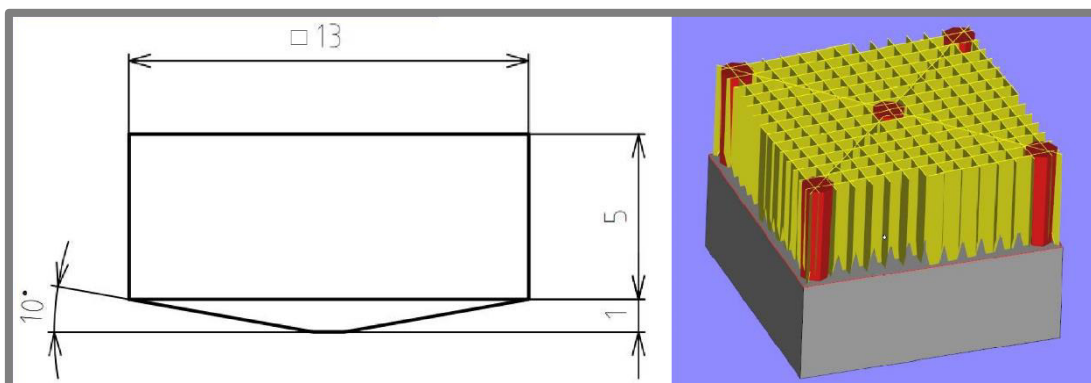


Obr. 5-21 Kompletní závislost skenovací rychlosti na relativní hustotě vzorku při použitím výkonu laseru 200 W

5.3 Experiment s využitím podpurných struktur

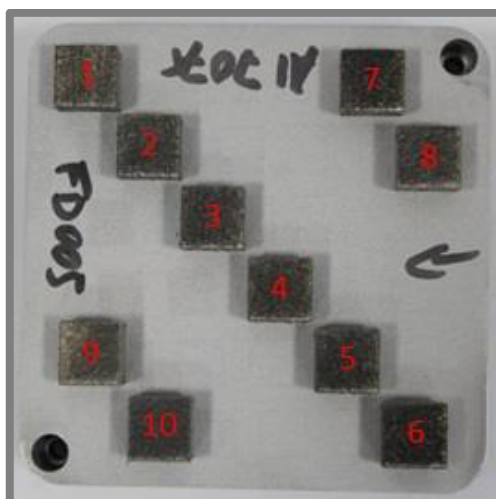
Snížení rychlosti odvodu tepla se kladně projevuje na vnitřní struktuře materiálu (Obr. 5-11), proto byl navrhnut test objemových vzorků na tzv. podpurných strukturách. Tyto struktury vzorek ještě více izolují od stavěcí platformy a tím snižují rychlost odvodu tepla z materiálu.

Vzorek měl specifický tvar odlišný od předchozích staveb (Obr. 5-22). Hlavní část vzorku představuje kostka s rozměry 13 x 13 x 5 mm, na které bude provedena analýza. Tato kostka je na spodní straně opatřena jehlanem svírající vrcholový úhel 160° . Jehlan zlepšuje napojení podpurné struktury a plného materiálu vzorku a snižuje riziko „zvedání“ z platformy způsobené napětím uvnitř vzorku. Celý tento vzorek je ustaven na podpurné struktuře *Block*, doplněna pěti válci *Cone* aby se vzorek neodděloval od platformy v průběhu tisku. Tyto válce byly rozmístěny ve všech čtyřech rozích a jeden uprostřed pod vrchol jehlanu a úhlopříčně byly spojeny tenkou stěnou (viz Obr. 5-13). Podpurné struktury všech vzorků měly stejné procesní parametry: výkon laseru 400 W a skenovací rychlost 1400 mm/s. Tvar a parametry byly inspirovány článkem zabývající se výrobou součástí z materiálu IN625 na podpurných strukturách. Touto problematikou se zabýval Ö. Poyraz v tureckém *TUSAS Engine Industries (TEI)*. [29]



Obr. 5-22 Tvar a rozměry vzorku s podporami

Vybrány byly vzorky z nejvíce perspektivních oblastí předchozích staveb. Rozmístění na „malé“ platformě je vidět na obrázku 5-23. Hlavní zkoumanou oblastí jsou vzorky s výkonem laseru 200 W a nižší rychlosti (100-170 mm/s). Experiment byl doplněn třemi vzorky s vyššími rychlostmi (650-900 mm/s) a výkonem laseru 300 W.

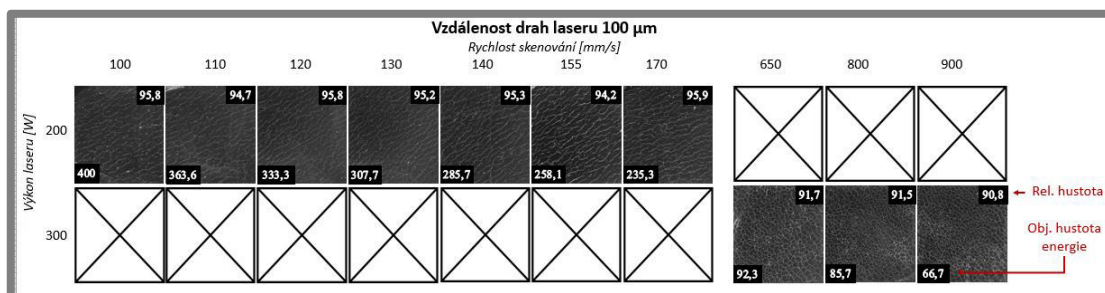


Číslo vzorku	Výkon laseru [W]	Rychlost laseru [mm/s]	Vzdálenost stop laseru [μm]	Výška vrstvy [μm]	Husota energie [J/mm ³]
FZ1-TDS-TD005_1	200	100	100	50	400,0
FZ1-TDS-TD005_2	200	110	100	50	363,6
FZ1-TDS-TD005_3	200	120	100	50	333,3
FZ1-TDS-TD005_4	200	130	100	50	307,7
FZ1-TDS-TD005_5	200	140	100	50	285,7
FZ1-TDS-TD005_6	200	155	100	50	258,1
FZ1-TDS-TD005_7	200	170	100	50	235,3
FZ1-TDS-TD005_8	300	650	100	50	92,3
FZ1-TDS-TD005_9	300	700	100	50	85,7
FZ1-TDS-TD005_10	300	900	100	50	66,7

Obr. 5-23 Rozložení vzorků na platformě a volené procesní parametry (test s podpůrnými strukturami)

Platforma byla v průběhu výroby vyhřátá na 80 °C. Uvnitř stavěcí komory teplota vzduchu při stavbě dosahovala 43,5 °C. Inertním plynem byl při této stavbě dusík (N₂) a obsah kyslíku v pracovním prostoru stroje byl v rozsahu 0,07-0,08 %.

Pořízené snímky vyleštěných vzorků byly seřazeny dle procesních parametrů do přehledného grafu na obrázku 5-24. Při použití výkonu laseru 200 W a skenovacích rychlostí v rozsahu 100-170 mm/s je patrné, že trhliny se šíří v jenom směru. Tento jev se neprojevuje ve vyšších rychlostech 650-900 mm/s.



Obr. 5-24 Přehled snímků dle výkonu laseru a skenovací rychlosti (test s podpůrnými strukturami)

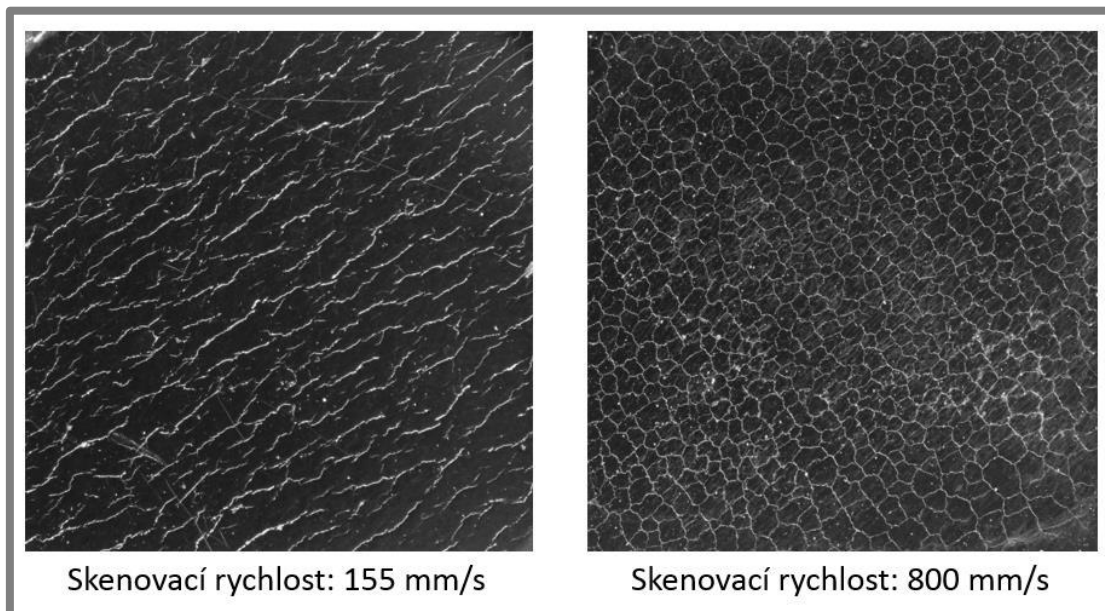
Relativní hustota vzorků se skenovací rychlostí 100-170 mm/s dosahuje přibližně 95 %. V těchto vzorcích je obsaženo minimální množství pórů. U vyšších skenovacích rychlostí 650-900 mm/s je na první pohled patrné zvýšení obsahu trhlín, a tedy snížení relativní hustoty vzorku přibližně na 91 %. Přehled hodnot relativní hustoty všech vzorků je uveden v tabulce 5-2.

Tab. 5-2 Porozita vzorků v procentech [%]

		Skenovací rychlost [mm/s]									
		100	110	120	130	140	155	170	650	700	900
Výkon laseru [W]	200	95,8	94,7	95,8	95,2	95,3	94,2	95,9	X	X	X
	300	X	X	X	X	X	X	X	91,7	91,5	90,8

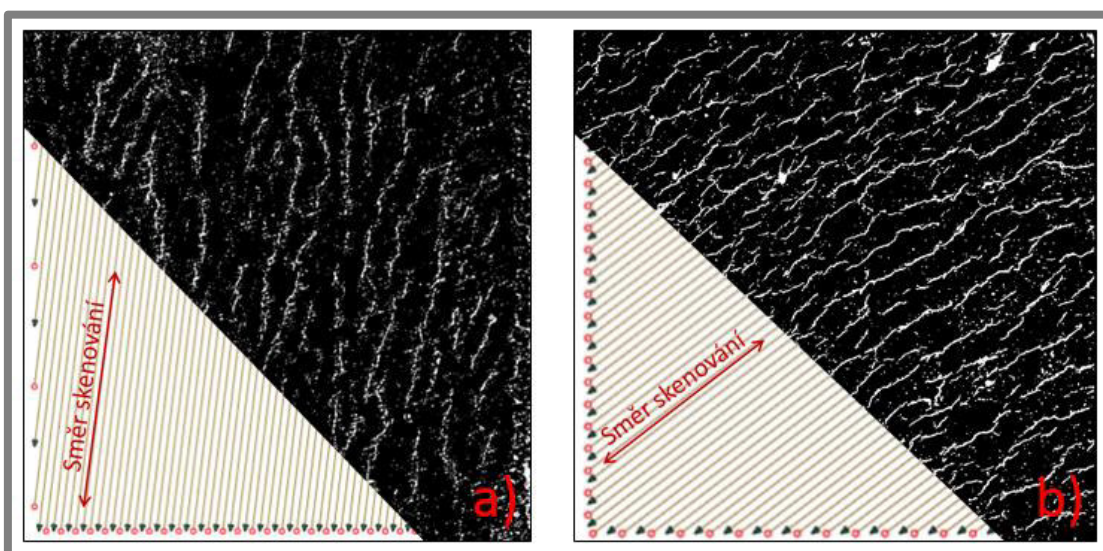
Použití podpůrných struktur se výrazně projevilo na směru šíření trhlín (viz Obr. 5-25). U vzorků s použitým výkonem laseru 200 W a nízkou skenovací rychlostí (100-170 mm/s) se trhliny šíří ve směru skenování laseru. Vyrobené vzorky

s výkonem laseru 300 W a skenovací rychlostí (650-900 mm/s) vykazují šíření trhlin všemi směry. Tyto trhliny jsou vzájemně propojeny a vytváří kontinuální síť. U této sítě však lze sledovat pravidelnost, kdy jsou propojovány trhliny z po sobě jdoucích vrstev.



Obr. 5-25 Porovnání vzorků z hlediska směru šíření trhlin (test na podpůrných strukturách)

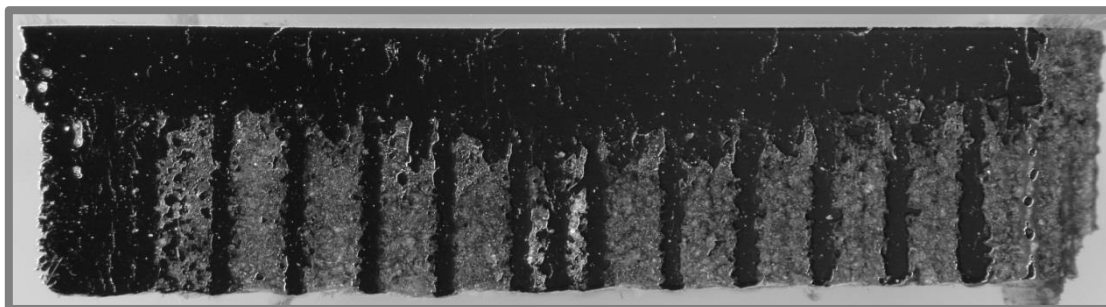
Obrázek 5-26 ukazuje, že trhliny se tvoří právě ve směru skenování. Trhliny na obrázku 5-26 *a* mají směr šíření pod úhlem 81° odpovídající skenovací strategii dané vrstvy. Na obrázku 5-26 *b* je tentýž vzorek probroušen na jinou vrstvu. Je zde na první pohled vidět změna směru růstu trhlin odpovídající se směrem skenování. V tomto případě se trhliny šíří pod úhlem 37° .



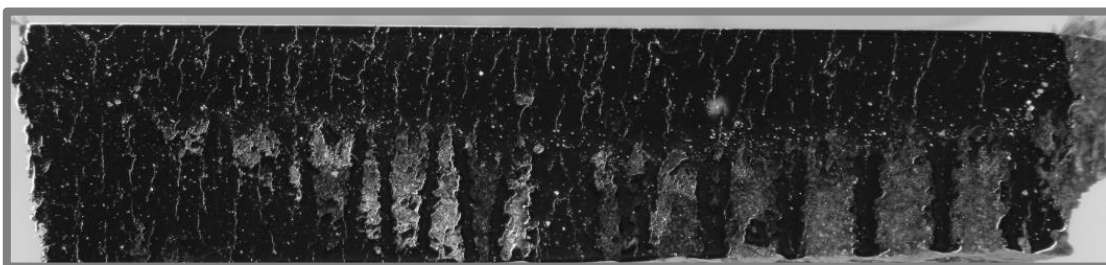
Obr. 5-26 Porovnání směru šíření trhlin pro různé vrstvy (výkon laseru 200 W, skenovací rychlost 155 mm/s)

Na vertikálních řezech vzorků se ještě více projevil rozdíl v tendenci šíření trhlin vlivem rychlosti skenování. Na obrázku 5-27 je zobrazen vertikální řez vzorkem s nízkou skenovací rychlostí 155 mm/s. Zde je patrné, že se trhliny mezi jednotlivými

vrstvami propojují pouze v pár případech, ale netvoří kontinuální trhlinu celé výšce vzorku. Naopak na obrázku 5-28 je na první pohled vidět, že trhliny se mezi jednotlivými vrstvami spojují a ve většině případů prostupují celým vzorkem. Z hlediska mechanických vlastností je mnohem příznivější využít menší rychlosti skenování, kdy trhliny neprostupují celou výškou vzorku.



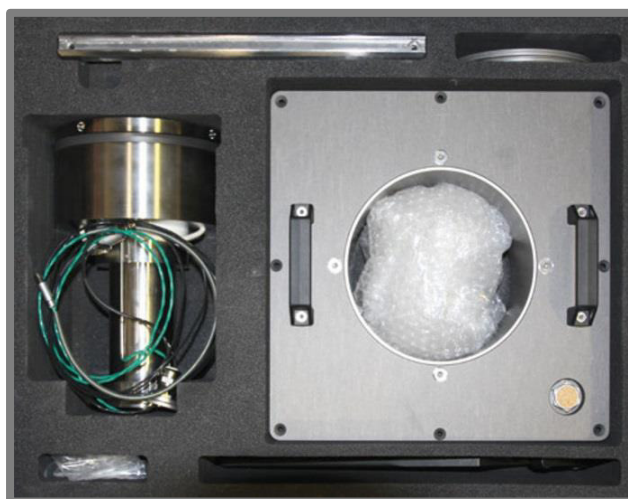
Obr. 5-28 Vertikální řez vzorkem (výkon laseru 200 W, skenovací rychlost 155 mm/s)



Obr. 5-27 Vertikální řez vzorkem (výkon laseru 300 W, skenovací rychlost 800 mm/s)

5.4 Objemové vzorky s využitím zvýšené teploty

Jak již bylo zjištěno u předchozích testů snížení rychlosti odvodu tepla lze realizovat zvýšením výhřevu stavěcí platformy. Navázáním na poznatky z druhé rozšířené stavby byl navrhnut experiment, kdy se platforma vyhřeje na vyšší teplotu než 200 °C. Z tohoto důvodu byla stavba realizována ve spolupráci s Technickou univerzitou v Grazu. Tamější institut výrobní technologie je vybaven modernizovaným zařízením SLM 280^{HL}. K dispozici navíc mají i vysokoteplotní vyhřívanou jednotku (viz Obr 5-29). Tato jednotka je schopna vyhřát kruhovou platformu až na teplotu 550 °C [30]. Konstrukce této vyhřívané jednotky je velmi podobná jako konstrukce redukce pro „malou“ platformu. V posuvném válci jsou umístěny topné patrony. Přes vyhřívanou destičku, pod kterou je umístěno teplotní čidlo, se teplo převádí přímo do stavební platformy. Vyhřívaná jednotka je standardně vybavena titanovými kruhovými platformami se stavebním prostorem o průměru 90 mm. Bylo tedy nutné vyrobit pro tento experiment hliníkové platformy s upravenými rozměry z důvodu odlišné teplotní roztažnosti hliníku. Platforma byla vyrobena z hliníkové slitiny EN AW 5083, tedy materiál, ze kterého jsou standardní hliníkové platformy.



Obr. 5-30 Vysokoteplotní vyhřívaná jednotka [27]

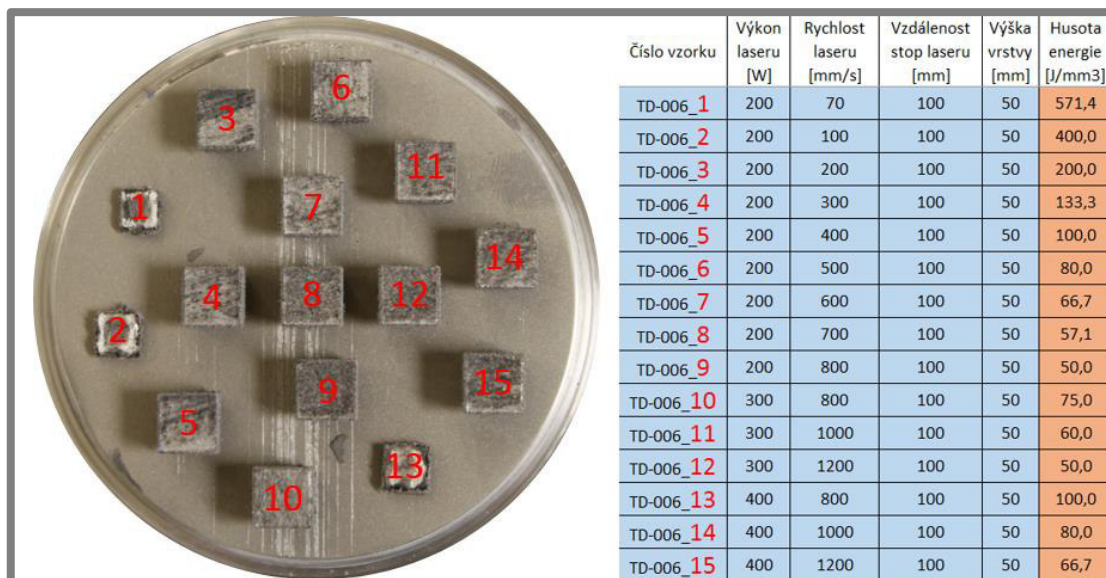
Pracovní prostor zařízení (viz. Obr 5-30) je uzpůsoben tak, aby bylo možné vyrábět součásti za zvýšených teplot. Hlavní rozdíl od zařízení na Ústavu konstruování je nanášecí zařízení. Z důvodu vysokých teplot není vybaveno žádnými dávkovacími motory ani čidly. O dávkování prášku se stará hlavní zásobník prášku, který před každým nanesením vrstvy dosype potřebné množství prášku do nanášecího zařízení. Samotné nanášení vrstvy je prováděno pomocí keramického bříty odolného proti vysokým teplotám.



Obr. 5-29 Pracovní prostor s vysokoteplotní jednotkou

Pro testování bylo navrženo 15 vzorků. Byly vybrány procesní parametry z předchozích experimentů, se kterými se dosáhlo relativně dobrých výsledků. K prozkoumání vlivu zvýšené teploty platformy byla vybrána oblast s výkonem laseru 200 W v kombinaci s nižšími skenovacími rychlostmi. Pro širší prozkoumání vlivu výhřevu byla vybrána i oblast vyšších výkonů laseru 300 W a 400 W s vyšší skenovací rychlostí. Seznam konkrétních procesních parametrů a rozložení vzorků na platformě je vidět na obrázku 5-31. Tvar vzorků byl stejný jako druhého rozšířeného testu (viz. Obr.5-8), tedy vzorek s rozměry 10x10mm opatřený komolým jehlanem na

spodní části. Platforma byla vyhřátá na 400 °C. Tato teplota byla stanovena s ohledem na žíhací teplotu materiálu platformy, která je zhruba 413 °C [31]. Teplota výhřevu platformy byla před stavbou zkontrolována, na povrchu stavěcí platformy, dvěma nezávislými měřicími zařízeními. Naměřena byla teplota 398 °C a 396 °C.

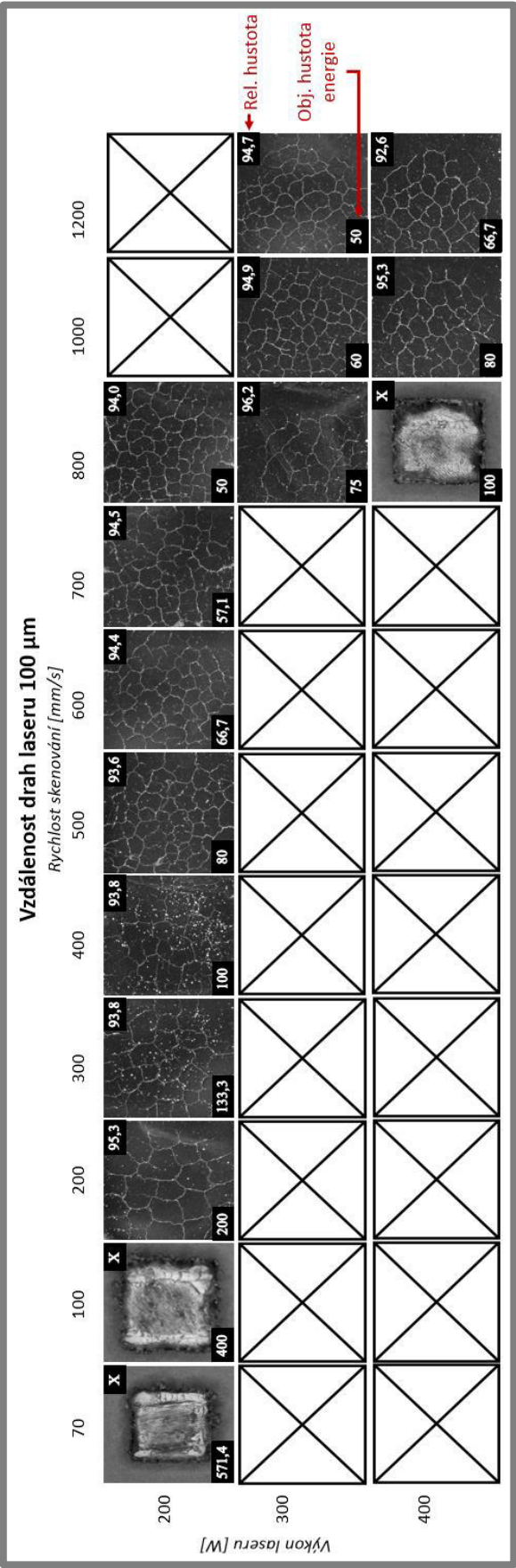


Obr. 5-31 Rozmístění vzorků na stavěcí platformě se zvolenými parametry (test za zvýšené teploty)

Teplota se uvnitř pracovního prostoru v průběhu výroby ustálila na hodnotě 49 °C. Inertním plynem byl při tomto experimentu argon. Díky argonu došlo opět ke snížení obsahu kyslíku v prostoru stavěcí komory na minimum (čidla vykazovaly nulové hodnoty).

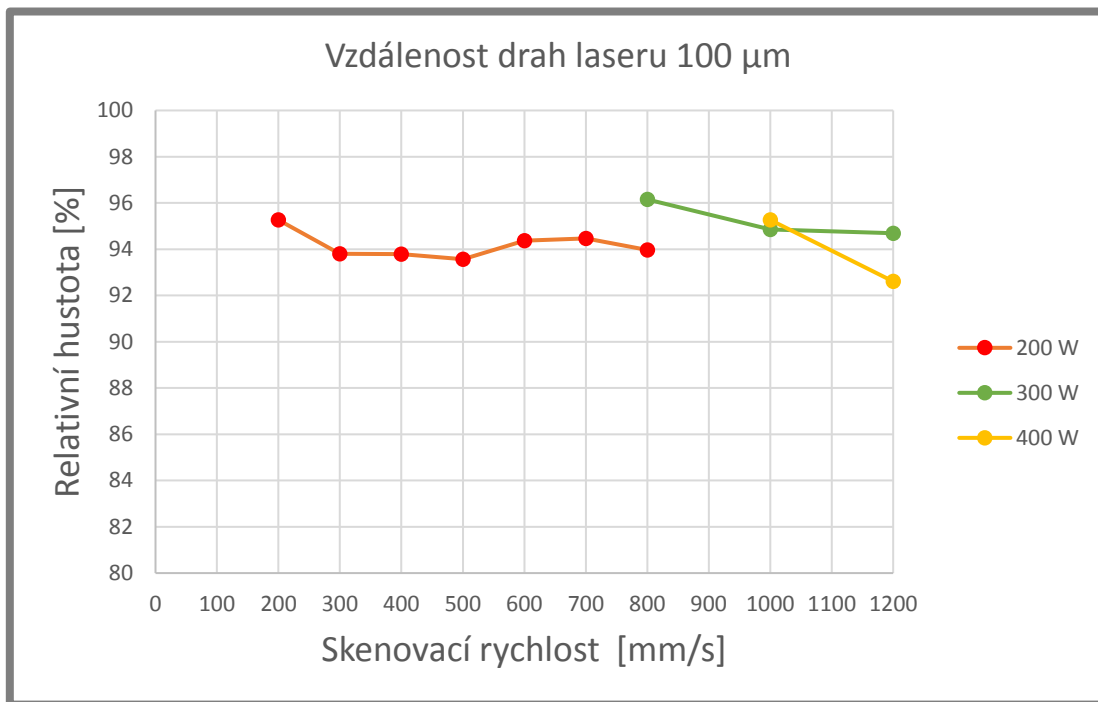
U dvou vzorků s nejvyšší hustotou objemové energie (vzorky 1 a 2) a jednoho s použitým výkonem laseru 400 W a skenovací rychlostí 800 mm/s (vzorek 13) docházelo k „vystupování“ hran nad úroveň prášku. Při nanášení nové vrstvy docházelo ke kontaktu těchto výstupků s keramickým břitem. Aby nedošlo k jeho poškození, byly v průběhu výroby tyto vzorky vypnuty.

Na obrázku 5-32 je vidět přehled snímků, vyleštěných výbrusů experimentu s využitím zvýšené teploty. U všech vzorků je zjištěna redukce množství trhlin uvnitř materiálu v porovnání s experimentem, kdy byla platforma vyhřátá na 200 °C. Přesto se trhliny objevují v celé šíři procesních parametrů a tvoří se ve všech směrech. Při překročení objemové hustoty energie 100 J/mm³ se začínají objevovat ve vzorcích metalurgické póry. Oblast výkonu laseru 200 W vykazuje se snižující se rychlostí úbytek trhlin uvnitř materiálu. Vzorky s výkonem laseru 300 W a 400 W vykazují rapidní úbytek trhlin na jednom, nebo dvou okrajích. Tento jev je patrný u vzorků umístěných na platformě blíže ke vstupu inertní. Lze tedy předpokládat, že je to způsobeno „ofukem“ vzorků proudem inertní atmosféry, který vzorek, ale i okolní prášek, z této strany intenzivně ochlazoval.



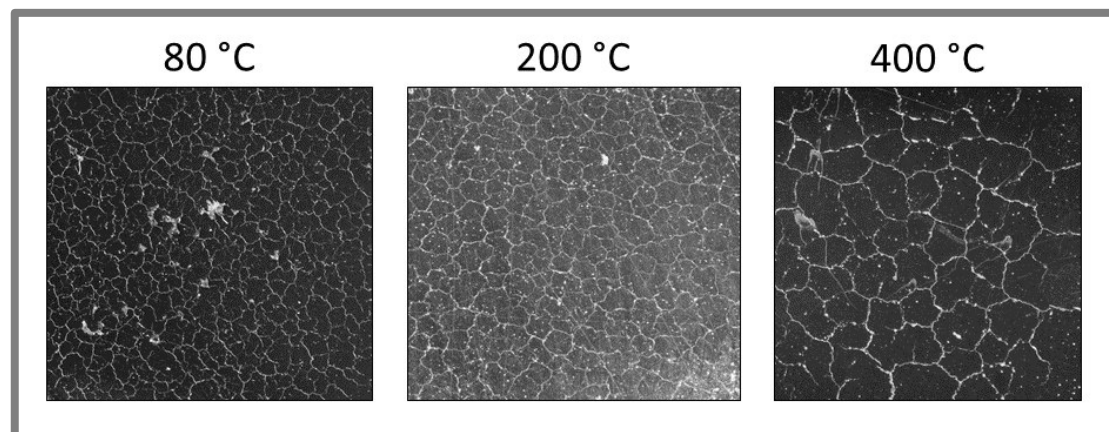
Obr. 5-32 Přehled snímků dle výkonu laseru a skenovací rychlosti (test za zvýšených teplot)

Graf na obrázku 5-33 udává závislost relativní hustoty na skenovací rychlosti pro experiment se zvýšenou teplotou platformy. Relativní hustota všech vzorků se pohybuje nad 92 %. Z průběhu závislosti pro výkon laseru 200 W je patrné že změna skenovací rychlosti v rozsahu 200-800 mm/s nemá na relativní hustotu zásadní vliv. Relativní hustota se u těchto vzorků pohybuje kolem 94 %.



Obr. 5-33 Závislost skenovací rychlosti na relativní hustotě vzorku (test za zvýšených teplot)

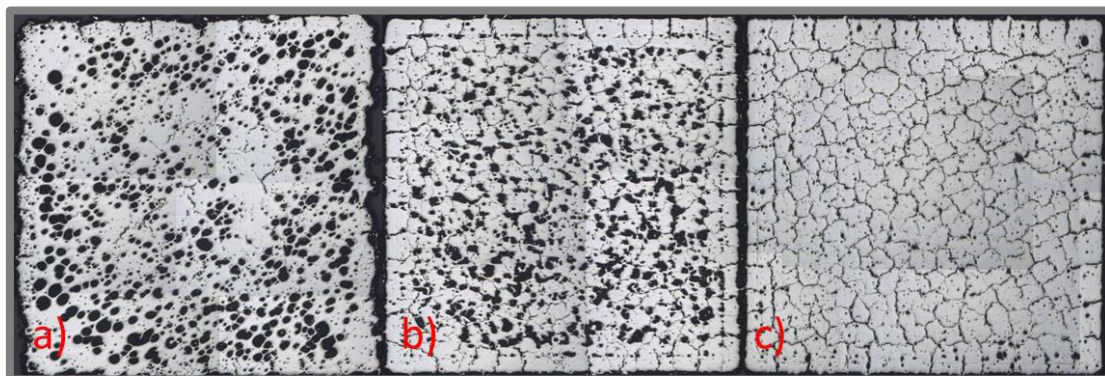
Pro závěrečné porovnání vlivu zvýšené teploty výhřevu platformy byl experiment doplněn „stavbou“ vzorků s výhřevem platformy na 80 °C. Tvar vzorku a procesní parametry zůstaly nezměněny. Vliv zvýšeného výhřevu platformy je patrný na obrázku 5-34. Vzorky byly stavěny s výkonem laseru 200 W a skenovací rychlostí 500 mm/s. Zvyšováním teploty výhřevu platformy je patrné zvětšování oblastí mezi trhlinami a redukce množství těchto trhlin. Zvýšením výhřevu z 80 °C na 200 °C se docílilo snížení obsahu keyhole pórů, ale zvýšil se obsah drobných metalurgických pórů. Ke snížení obsahu těchto pórů pomohlo zvýšení výhřevu na 200 °C. Porovnání ostatních vzorků je uveden v příloze 6.



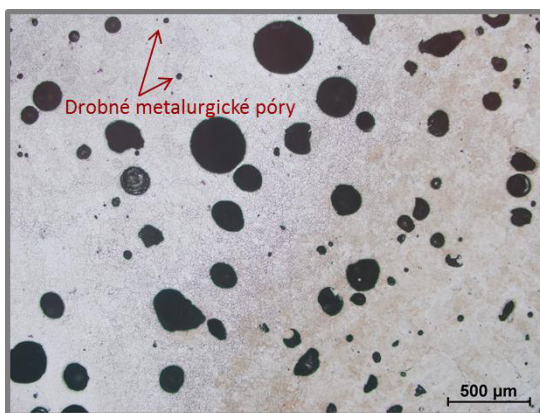
Obr. 5-34 Vliv výhřevu platformy (rozměry vzorku 10 x 10, výkon laseru 200 W, skenovací rychlost 500 mm/s)

5.5 Mikrostruktura

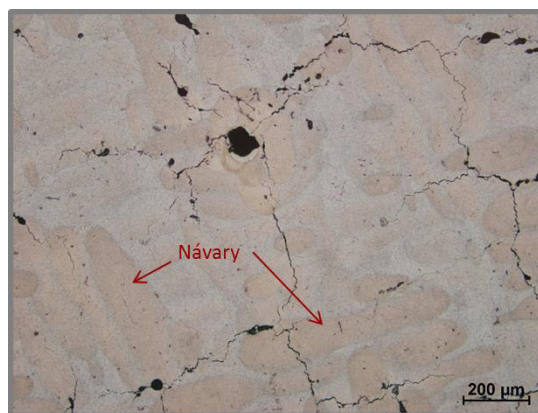
Tento test byl vytvořen za účelem odhalení mechanismu vzniku trhlin uvnitř materiálu a jejich tendence šíření. Byly vybrány tři charakteristické vzorky (viz. Obr. 5-35) s obsahem metalurgických pórů, s obsahem keyhole porozity a vzorek obsahující převážně trhlin uvnitř vzorku. Vzorky byly naleptány leptadlem Fuss. Naleptáním se objevily velmi drobné póry, které po vyleštění vzorků nebyly patrné (viz Obr.5-36). Na obrázku 5-37 je vidět charakter mikrostruktury zpracovaného materiálu technologií Selective Laser Melting. Jsou zde jednotlivé návary, které jsou ve fotce znázorněny hnědou barvou. Tyto svary mají poměrně ostrou hranici. Dobře jsou patrné póry i trhliny.



Obr. 5-35 Vzorky vybrané na rozbor mikrostruktury; a) s velkým množstvím metalurgických pórů, b) s velkým množstvím keyhole pórů, c) velkým množstvím trhlin

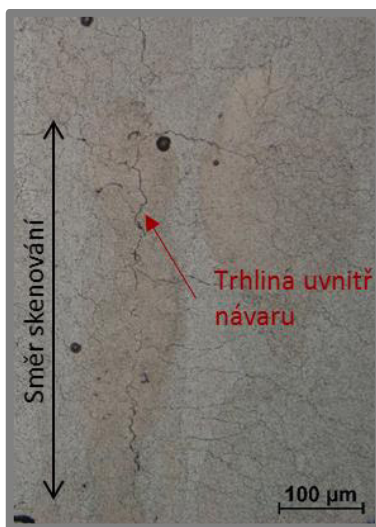


Obr. 5-36 Mikrostruktura vzorku s velkým množstvím metalurg. pórů

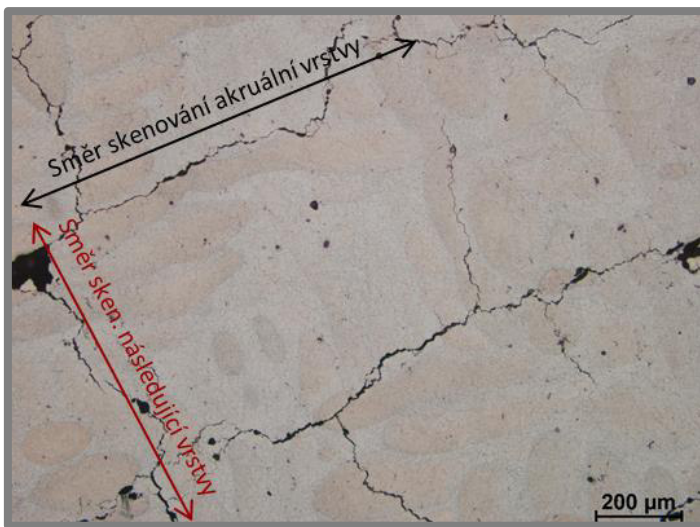


Obr. 5-37 Mikrostruktura vzorku velkým obsahem trhlin

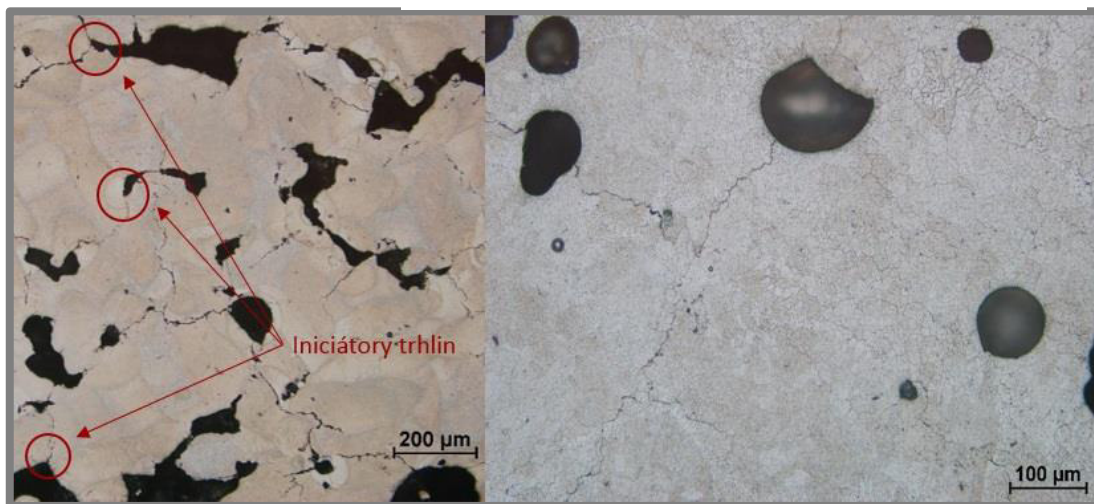
Při procesu výroby vzniká uvnitř vzorku zbytkové napětí způsobené teplotním gradientem ve směru dráhy laseru. Toto zbytkové napětí způsobuje vznik a růst trhlin. Chladnutí a tuhnutí jednotlivých návary může vést také k tvorbě trhlin ve směru skenování (viz Obr. 5-38). Spékáním následují vrstvy je původní svar nataven a původní trhlina se „rozvětví“ ve směru skenování této vrstvy (viz Obr. 39). Z obrázku 5-40 je patrné že trhliny se uvnitř struktury materiálu iniciují vzniklými póry. Iniciace trhlin póry snadněji vzniká při výskytu keyhole pórů než kulatými metalurgickými póry. Způsobeno je to právě tvarem pórů. Keyhole pór obsahuje výčnělky, ve kterých vzniká trhlina snadněji než u pravidelně kulového tvaru metalurgického póru.



Obr. 5-38 Vznik trhlin ve směru sken.



Obr. 5-39 "Rozvětvení" trhliny tvorbou následující vrstvy



Obr. 5-40 Rozdíl mezi šířením trhliny a) keyhole pórem; b) metalurgickým pórem

5.6 Tvrdost

Tvrdost byla měřena přenosným tvrdoměrem DYNA TH-1100 (viz Obr.5-41), který je schopný měřit hodnoty tvrdosti všech běžných stupnic. Tvrdost každého vzorku byla měřena vždy na pěti místech a následně z těchto měření byla vytvořena střední hodnota.



Obr. 5-41 Přenosný tvrdoměr DYNA TH-1100

5.6.1 Referenční materiál

5.6.1

Standardně dostupný materiál hliníkové slitiny EN AW 7075-T6, tedy ve stavu po rozpouštěcím žhání s následným umělým stárnutím dosahuje tvrdosti 150 HB. Pokud je materiál žhán ke snížení vnitřních napětí (označení EN AW 7075-O), klesne tvrdost na 60 HB [32].

5.6.2 SLM materiál

5.6.2

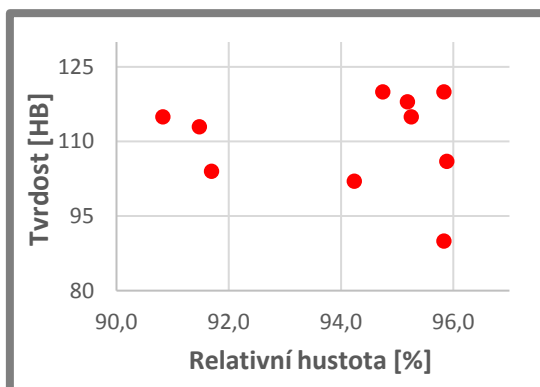
Tvrdost vzorků s využitím podpůrných struktur

V tabulce 5-3 jsou uvedeny výsledky tvrdostí všech vzorků daného experimentu. Čísla vzorků a jejich procesní parametry odpovídají obrázku 5-23.

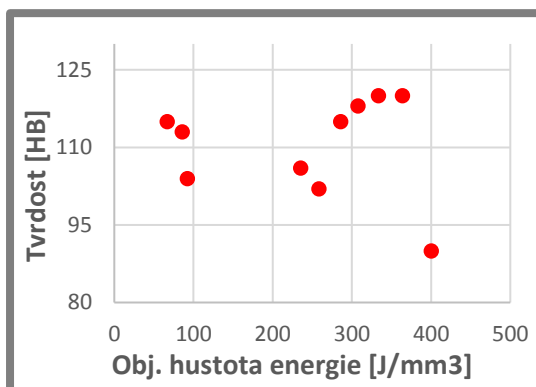
Tab. 5-3 Tvrdost vzorků s využitím podpůrných struktur

Číslo vzorku	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Tvrdost [HB]	90	120	120	118	115	102	106	104	113	115

Z Grafů na obrázcích 5-42 a 5-43 nelze vyvodit žádnou závislost mezi tvrdostí a relativní hustotou nebo hustotou objemové energie.



Obr. 5-42 Závislost tvrdosti na relativní hustotě



Obr. 5-43 Závislost tvrdosti na obj. hustotě energie

U dvou vzorků byla změřena mikrotvrdost v částech, kde se nevyskytuje trhlinka. U vzorku číslo 6 bylo naměřeno 106 HV a vzorek číslo 10 vykazoval tvrdost 120 HV. V tomto rozsahu jsou tvrdosti HV a HB totožné, proto je možné tyto hodnoty porovnat. Odchyly v tvrdostech jsou 3,8 % pro vzorek číslo 6 a 4,2 % pro vzorek číslo 10. U experimentu s podpůrnými strukturami bylo dosaženo maximální tvrdosti 120 HB, což odpovídá 80 % tvrdosti tepelně zpracované slitiny 7075-T6.

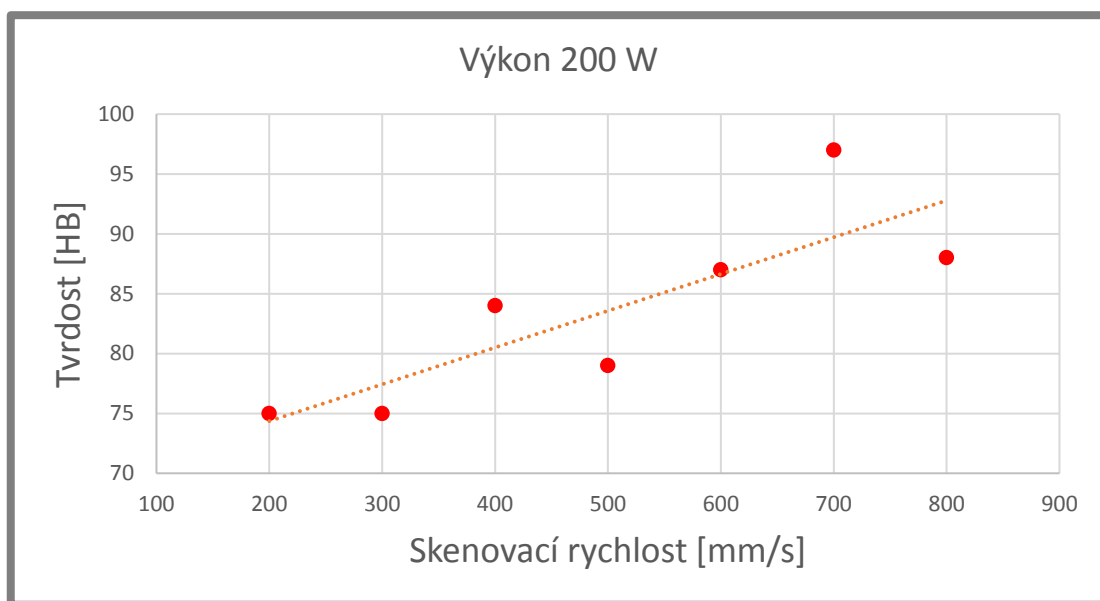
Tvrdost vzorků vyrobených za zvýšené teploty

Výsledky měření tvrdosti vzorků experimentu s výhřevem platformy na 400 °C jsou uvedeny v tabulce 5-4. označení a procesní parametry odpovídají obrázku 5-31.

Tab. 5-4 Tvrdost vzorků vyrobených za zvýšené teploty

Číslo vzorku	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Tvrdost [HB]	X	X	75	75	84	79	87	97	88	97	73	96	X	82	92

Obdobně jako u experimentu s podpůrnými strukturami ani při tomto testu nebyla sledována žádná závislost mezi tvrdostí a relativní hustotou nebo objemovou hustotou energie. Je zde však patrna závislost tvrdosti na skenovací rychlosti u vzorků vyráběných výkonem laseru 200 W (viz Obr. 5-44). Se zvyšující se skenovací rychlostí roste i tvrdost materiálu. To je způsobeno důsledkem tvorby jemnozrnné struktury díky rychlejšímu chladnutí tavné lázně.



Obr. 5-44 Závislost tvrdosti na skenovací rychlosti vzorků vyrobených za zvýšené teploty.

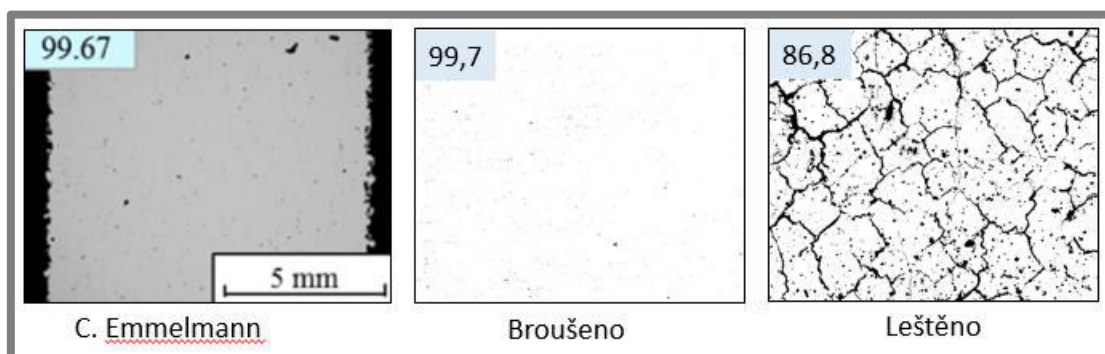
Mikrotvrdost měřena na dvou vybraných vzorcích dosahovala tvrdosti 79 HV u vzorku číslo 3 a 80 HV u vzorku číslo 10. U experimentu za zvýšených teplot bylo dosaženo nejvyšší tvrdosti 97 HB, což odpovídá 65 % tvrdosti slitiny 7075-T6.

6 DISKUZE

Analýza velikosti a distribuce prášku se shodovala s dodavatelem udávanými hodnotami. Prášek splňuje požadavky pro použití tloušťky nanášené vrstvy 50 μm při výrobě technologií SLM. Mohlo být tedy přistoupeno k experimentálnímu zjišťování vlivu procesních parametrů.

U všech objemových vzorků byla sledována relativní hustota vzorků, která se zjišťovala pomocí obrazové analýzy. Ta je ovlivněna obsahem pórů, ale v případě hliníkové slitiny 7075 hlavně obsahem trhlin uvnitř materiálu. Bylo sestaveno několik přehledových grafů a závislostí relativní hustoty na procesních parametrech.

V prvním i druhém rozšířeném testu objemových vzorků se projevíly trhliny celé šíři procesních parametrů. Výsledky lze kategorizovat do tří oblastí: oblast vysoké objemové energie s výskytem metalurgických pórů, oblast nízké objemové energie s vysokou mírou obsahu keyhole pórů a v poslední řadě oblasti, u nichž se podařilo eliminovat většinu pórů. V těchto oblastech byla porozita ve vzorcích tvořena převážně trhlínami. V následujících testech byla snaha o minimalizování obsahu těchto trhlin, a přitom se nedostát do oblasti, kde by se zvyšovalo množství pórů. Z tohoto hlediska se ukázalo dobré použít výkonu 200 W, ale nakonec nedošlo k úplné eliminaci trhlin. Nejlepším výsledky těchto experimentů je relativní hustota vzorku 95,6 % při použití výkonu laseru 200 W a skenovací rychlosti 90 mm/s. Žádný z výsledků se nepřiblížil hodnotám relativní hustoty deklarovanými v článku německé univerzity v Hamburku. Zarážející je, dosažení odlišných výsledků při stejných procesních parametrech. Důvodem je, že C. Emmelmann [28] ve svém výzkumu využíval pouze vybroušené vzorky bez následného vyleštění, což se ukázalo jako nedostatečné. Analýzou vybroušeného vzorku s použitými stejnými procesními parametry byly zjištěny obdobné výsledky, ale po vyleštění klesla relativní hustota vzorku o více než 10 % (Obr. 6-1)



Obr. 6-1 Porovnání výsledků relativní hustoty (výkon laseru 400 W, skenovací rychlost 1200 mm/s)

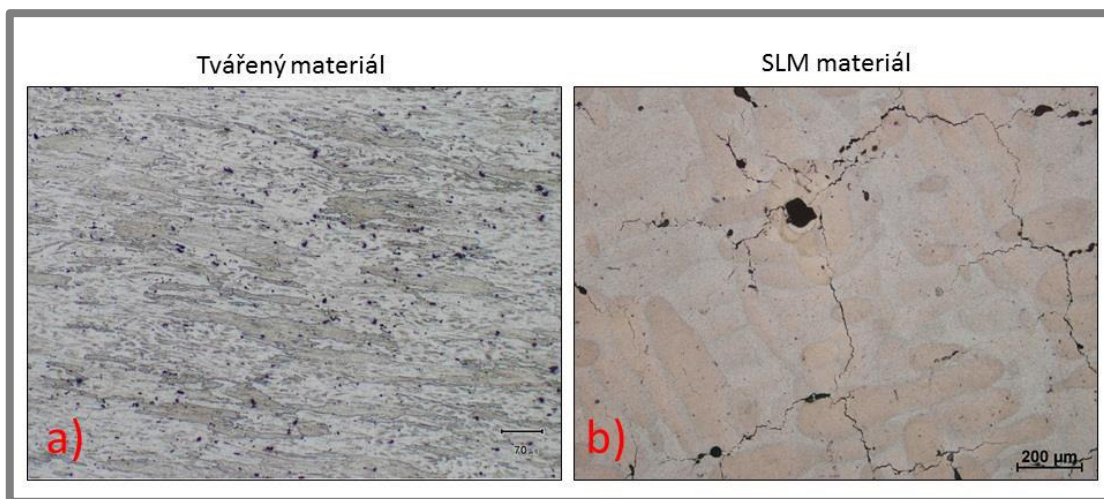
Zásadní vliv z hlediska šíření trhlin byl zjištěn při stavbě vzorků na podpurných strukturách. Struktury lépe izolovaly vzorek od platformy a rapidně tak snížily odvod tepla ze vzorku. S využitím výkonu 200 W a skenovací rychlosti v rozsahu 100-170 mm/s došlo k redukci míry trhlin uvnitř materiálu. Tyto trhliny se šířily ve směru skenování laserem. Ve vertikálním řezu bylo zjištěno, že většina trhlin se vzájemně mezi vrstvami nepropojuje na rozdíl od vzorku s výkonem 300 W

a skenovací rychlostí vyšší než 650 mm/s. U těchto vzorků docházelo k propojení trhlin mezi vrstvami v celé výšce vzorku.

Zvyšováním výhřevu platformy byla zjištěna náchylnost této hliníkové slitiny na rychlé tuhnutí taveniny. Experimenty byly prováděny při výhřevu na 80, 200, a 400 °C. Sledována byla nejen redukce porozity, ale také postupné snižování míry trhlin uvnitř vzorku (viz Obr. 6-2). Bohužel ale nedošlo k úplné eliminaci těchto trhlin.

Analýza mikrostruktury potvrdila šíření trhlin ve směru skenování. Při procesu výroby vzniká uvnitř vzorku zbytkové napětí způsobené teplotním gradientem ve směru dráhy laseru. Toto zbytkové napětí způsobuje vznik a růst trhlin. K tvorbě trhlin napomáhá chladnutí a tuhnutí jednotlivých svarů ve směru skenování. Trhlina se objevuje ve středu návaru, kde materiál tuhne nejpomaleji. Skenováním laserem následující vrstvy dochází k natavení předchozí vrstvy, což způsobí propojení trhlin obou vrstev a vytvoření kontinuální „sítě“ trhlin. K iniciaci trhlin výrazně přispívají póry obsažené v materiálu. Větší vliv na vznik trhliny mají key hole póry v porovnání s metalurgickými póry, které mají pravidelný kulový tvar.

U tvářeného materiálu [33] dochází k uspořádání a řádkování struktury ve směru tváření (viz Obr. 6-2 a). Vzniká tak anizotropie mechanických vlastností. Při zpracování slitiny technologií SLM vzniká jemnozrná struktura. Zpracovaný materiál 7075 ale v současné době vykazuje velké množství defektů ve formě trhlin. (viz Obr. 6-2 b).



Obr. 6-2 Porovnání mikrostruktury s tvářeným materiálem

Vzhledem k vysokému obsahu trhlin uvnitř materiálu bylo ze zkoušek mechanických vlastností provedeno pouze měření tvrdosti. Vzorky na podpurných strukturách dosahovaly 66,7 % tvrdosti tepelně zpracovávané slitiny EN AW 7075-T6. Dále byl zjištěn pokles tvrdosti vzorků vlivem vyššího výhřevu platformy. Při vyhřátí platformy na 400 °C dosahovaly vzorky tvrdosti kolem 85 HB, což odpovídá. U tohoto experimentu bylo zjištěno, že se zvyšující se skenovací rychlostí roste tvrdost materiálu. To je způsobeno důsledkem tvorby jemnozrné struktury díky rychlejšímu chladnutí tavné lázně.

Hliníková slitina EN AW 7075 je obtížně zpracovatelná z důvodu náchylnosti na tvorbu trhlin. Jejich výskyt se v materiálu snižuje použitím nižších skenovacích rychlostí, a hlavně snížením rychlosti odvodu tepla ze vzorku. Možností, jak tento materiál zpracovat technologií SLM je vytvoření hybridního materiálu změnou chemického složení přidáním 4 % křemíku Si [34]. Po přidání křemíku se již ale nejedná přímo o materiál EN AW 7075 Tento materiál se chemickým složením blíží siluminům.

7 ZÁVĚR

Diplomová práce byla zaměřena na objasnění vlivu jednotlivých procesních parametrů při zpracování hliníkové slitiny EN AW 7075 technologií Selective Laser Melting na výslednou porozitu materiálu a jeho mechanické vlastnosti. Cíle této diplomové práce byly splněny.

Experimenty byly provedeny na výrobním zařízení SLM 280^{HL} s výjimkou experimentu za zvýšených teplot, který se provedl ve spolupráci s Technickou univerzitou v Grazu. Celkem se vyrobilo 269 objemových vzorků. Výsledky se stanovily v rozsahu výkonu laseru 100-400 W, skenovací rychlost 50-1500 mm/s a vzdálenosti drah laseru 100-150 μm . Skenovací rychlosti nižší než 50 mm/s nebyly zkoumány, přestože je možné že výskyt trhlin by mohl v této oblasti ještě poklesnout. Pro technologii SLM je však tato oblast nevýhodná. Výroba prototypu těmito rychlostmi by byla zdoluhavá a finančně nevýhodná. Testy se realizovaly při výhřevu stavěcí platformy na 80, 200 a 400 W, a to jak s použitím dusíku, tak argonu jako inertního plynu.

Byly určeny závislosti různých procesních parametrů na relativní hustotě materiálu. Ve všech zkoumaných vzorcích se objevily trhliny, které jsou z hlediska mechanických vlastností nežádoucí. Nejlepších výsledků bylo dosaženo při výrobě vzorků na podpůrných strukturách a za zvýšené teploty výhřevu platformy. Nejvyšší relativní hustota u experimentu podpůrnými strukturami dosahovala až 95,9 % a při zvýšené teplotě platformy na 400 °C až 96,2 %.

Mikrostruktura objasnila šíření a vznik trhlin uvnitř materiálu. Izolováním vzorku od platformy pomocí podpůrných struktur se trhliny, při využití výkonu laseru 200 W a nižších skenovacích rychlostí, usměrnily ve směru skenování laserem.

Materiál vyrobený technologií SLM má jemnozrnnou strukturu, ale v současné době vykazuje velké množství defektů, což omezilo měření mechanických vlastností pouze na tvrdost. U experimentu s podpůrnými strukturami byla zjištěna tvrdost až 120 HB. Při vyhřátí stavěcí platformy se zjistila závislost tvrdosti na skenovací rychlosti, kdy bylo dosaženo tvrdosti až 97 HB.

Lze tedy konstatovat, že hliníková slitina EN AW 7075 je výrazně náchylná na rychlé tuhnutí taveniny a primárním faktorem při hledání vhodného nastavení procesních parametrů je primárním faktorem přestup tepla.

Prostor pro pokračování je ve stavbě dílů za zvýšených teplot s využitím podpůrných struktur, nebo ověření zpracovatelnosti technologií SLM při drobné změně chemického složení.

8 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] OLAKANMI, E.O., R.F. COCHRANE a K.W. DALGARN. *A review on selective laser sintering/melting (SLS/SLM) of aluminium alloy powders: Processing, microstructure, and properties* [online]. 2015 [cit. 2016-11-09]. DOI: 10.1016/j.pmatsci.2015.03.002. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0079642515000389>
- [2] History of 3D Printing: The Free Beginner's Guide. *3D Printing Industry* [online]. 2014 [cit. 2016-04-20]. Dostupné z: <http://3dprintingindustry.com/3d-printing-basics-free-beginners-guide/history/>
- [3] Far-reaching technology for aircraft manufacture that pollutes less. *EurekAlert!: The Global Source for Science News* [online]. American Association for the Advancement of Science, 2017 [cit. 2017-04-03]. Dostupné z: https://www.eurekalert.org/pub_releases/2014-12/ef-ftf121014.php
- [4] *Apparatus for production of three-dimensional objects by stereolithography*. b.r. USA. Uděleno 11. 4. 1986. Dostupné také z: <https://patentscope.wipo.int/search/en/detail.jsf?docId=US142541186&recNum=1&maxRec=38&office=&prevFilter=&sortOption=Pub+Date+Desc&queryString=FP%3A%28Apparatus+for+production+of+three-dimensional+objects+by+stereolithography+%29&tab=NationalBiblio>
- [5] WOHLERS, Terry T. *Wohlers report 2013: additive manufacturing and 3D printing state of the industry, annual worldwide progress report*. Fort Collins, Colo: Wohlers Associates, 2013. ISBN 09-754-4299-6.
- [6] WOHLERS, Terry T. a Tim. CAFFREY. *Wohlers report 2015: 3D printing and additive manufacturing state of the industry annual worldwide progress report*. Fort Collins, Colo.: Wohlers Associates, 2015. ISBN 978-099-1333-219.
- [7] YADROITSEV, I. a I. SMUROV. *Selective laser melting technology: From the single laser melted track stability to 3D parts of complex shape* [online]. 2010 [cit. 2016-04-24]. DOI: 10.1016/j.phpro.2010.08.083. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1875389210005092>
- [8] Selective Laser Melting (SLM). *Popular3dprinters.com* [online]. 2013 [cit. 2016-04-21]. Dostupné z: <http://www.popular3dprinters.com/selective-laser-melting-slm/>
- [9] ABOULKHAIR, Nesma T., Nicola M. EVERITT, Ian ASHCROFT a Chris TUCK. *Reducing porosity in AlSi10Mg parts processed by selective laser melting* [online]. 2014, , 77-86 [cit. 2016-04-21]. DOI: 10.1016/j.addma.2014.08.001. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2214860414000062>
- [10] GU, Dongdong a Yifu SHEN. *Processing conditions and microstructural features of porous 316L stainless steel components by DMLS* [online]. 2008 [cit. 2016-04-24]. DOI: 10.1016/j.apsusc.2008.06.118. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0169433208015456>

- [11] LOUVIS, Eleftherios, Peter FOX a Christopher J. SUTCLIFFE. *Selective laser melting of aluminium components* [online]. 2010 [cit. 2016-04-24]. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2010.09.019. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0924013610003018>
- [12] LI, Ruidi, Jinhui LIU, Yusheng SHI, Li WANG a Wei JIANG. *Balling behavior of stainless steel and nickel powder during selective laser melting process* [online]. 2011 [cit. 2016-04-26]. DOI: 10.1007/s00170-011-3566-1. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/s00170-011-3566-1>
- [13] WEINGARTEN, Christian, Damien BUCHBINDER, Norbert PIRCH, Wilhelm MEINERS, Konrad WISSENBAACH a Reinhart POPRAWE. *Formation and reduction of hydrogen porosity during selective laser melting of AlSi10Mg* [online]. 2015 [cit. 2016-04-26]. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2015.02.013. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0924013615000564>
- [14] NORRIS, J.T., C.V. ROBINO, D.A. HIRSCHFELD a M.J. PERRICONE. *Effects of Laser Parameters on Porosity Formation: Investigating Millimeter Scale Continuous Wave Nd:YAG Laser Welds* [online]. 2011, , 198-203 [cit. 2016-04-26]. Dostupné z: https://app.aws.org/wj/supplement/wj201110_s198.pdf
- [15] COURTOIS, M., M. CARIN, P. LE MASSON a S. GAIED. *A two-dimensional axially-symmetric model of keyhole and melt pool dynamics during spot laser welding* [online]. b.r. [cit. 2017-05-18]. DOI: 10.1051/metal/2013060. Dostupné z: <http://www.metallurgical-research.org/10.1051/metal/2013060>
- [16] DAI, Donghua a Dongdong GU. *Thermal behavior and densification mechanism during selective laser melting of copper matrix composites: Simulation and experiments* [online]. 2013 [cit. 2016-04-26]. DOI: 10.1016/j.matdes.2013.10.006. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0261306913009333>
- [17] HU, B. a I.M. RICHARDSON. Mechanism and possible solution for transverse solidification cracking in laser welding of high strength aluminium alloys. *Materials Science and Engineering: A* [online]. 2006, **429**(1-2), 287-294 [cit. 2017-05-17]. DOI: 10.1016/j.msea.2006.05.040. ISSN 09215093. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0921509306007623>
- [18] MANFREDI, Diego. *Additive Manufacturing of Al Alloys and Aluminium Matrix Composites (AMCs)* [online]. 2014 [cit. 2016-04-21]. Dostupné z: <http://cdn.intechopen.com/pdfs-wm/46882.pdf>
- [19] RESCHETNIK, W., J.-P. BRÜGGEMANN, M.E. AYDINÖZ, O. GRYDIN, K.-P. HOYER, G. KULLMER a H.A. RICHARD. *Fatigue crack growth behavior and mechanical properties of additively processed EN AW-7075 aluminium alloy* [online]. Catania, Italy, 2016, (2) [cit. 2016-11-09]. DOI: 10.1016/j.prostr.2016.06.380. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2452321616303985>
- [20] Tabulka slitin: Standardně používané Al slitiny pro zápusťkové výkovky. *Strojmetal aluminium forging* [online]. 2016 [cit. 2016-11-09]. Dostupné z: <http://www.strojmetal.cz/tabulka-slitin>

- [21] Mechanické a fyzikální vlastnosti hliníkových slitin. *Alunet* [online]. 2017 [cit. 2017-05-07]. Dostupné z: <http://www.alunet.cz/pouzito>
- [22] Označování hliníku a slitiny hliníku podle ČSN EN: Označování hliníku a slitin hliníku pro tváření podle ČSN EN 573- 1 až 3 [online]. In: . b.r. [cit. 2016-11-09].
- [23] SVOBODA, Pavel. *Základy konstruování*. Vyd. 4. Brno: CERM, 2011. ISBN 978-80-7204-750-5.
- [24] Porovnání označení hliníkových slitin podle EN - ČSN - DIN. *Amari* [online]. 2016 [cit. 2016-11-09]. Dostupné z: <http://www.amari.at/website/fileadmin/pdf/Porovnan-oznaceni.pdf>
- [25] SLM®280HL. *Slm-solutions* [online]. 2016 [cit. 2016-11-09]. Dostupné z: <https://slm-solutions.com/products/machines/slmr280hl>
- [26] SLM 280 HL. *Enicon additive technology* [online]. 2015 [cit. 2016-11-09]. Dostupné z: http://enicon.org/promyishlennyye/slm_280hl
- [27] DOKOUPIL, Filip. *Zpracování slitiny 2618 pomocí technologie selective laser melting*. Brno, 2016. Diplomová. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Doc. Ing. David Paloušek, Ph.D.
- [28] KAUFMANN, N., M. IMRAN, T.M. WISCHEROPP, C. EMMELMANN, S. SIDDIQUE a F. WALTHER. *Influence of Process Parameters on the Quality of Aluminium Alloy EN AW 7075 Using Selective Laser Melting (SLM)* [online]. 2016 [cit. 2017-04-22]. DOI: 10.1016/j.phpro.2016.08.096. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1875389216302036>
- [29] POYRAZ, Ö., E. YASA, G. AKBULUT, A. ORHANGÜL a S. PILATIN. *INVESTIGATION OF SUPPORT STRUCTURES FOR DIRECT METAL LASER SINTERING (DMLS) OF IN625 PARTS* [online]. 2015, , 560-574 [cit. 2017-05-14]. Dostupné z: <https://sffsymposium.engr.utexas.edu/sites/default/files/2015/2015-45-Poyraz.pdf>
- [30] HIGH TEMP. SUBSTRATE-PLATE HEATING FOR SLM 280. *Slm-solutions* [online]. b.r. [cit. 2017-05-14]. Dostupné z: <https://slm-solutions.com/products/machines/high-temp-substrate-plate-heating-slm-280>
- [31] Aluminum 5083-H112. *Matweb: MATERIAL PROPERTY DATA* [online]. b.r. [cit. 2017-05-14]. Dostupné z: <http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=bd6317b19dd94faf8bff851e4f339e88>
- [32] MICHNA, Štefan a Ivan LUKÁČ. *Encyklopedie hliníku*. Děčín: Alcan Děčín Extrusions, 2005. ISBN 80-890-4188-4.
- [33] BARTÁKOVÁ, Denida. *NÍZKOCYKLOVÁ ÚNAVA HLINÍKOVÉ SLITINY EN-AW 7075*. Brno, 2011. BAKALÁŘSKÁ PRÁCE. VUT v Brně.
- [34] MONTERO SISTIAGA, Maria L., Raya MERTENS, Bey VRANCKEN, Xiebin WANG, Brecht VAN HOOREWEDER, Jean-Pierre KRUTH a Jan VAN HUMBEECK. *Changing the alloy composition of Al7075 for better processability by selective laser melting* [online]. b.r. [cit. 2017-05-16]. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2016.08.003. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0924013616302722>

9 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN

Zkratka	Význam
3D	třidimenzionální
CAD	Computer Aided Design
ČSN	Česká národní norma
DIN	Deutsches Institut für Normung
EN	Evropská norma
HV	Hardness Vickers
HB	Brinell hardness
ISO	International Organization for Standardization
LED	Lineární Energy density
SLM	Selective Laser Melting
SLA	Stereolithography
STL	Standard Tessellation Language
PC	Personal Computer

Symbol	Jednotka Popis
E	(J/mm ³) objemová hustota energie
h	(mm) tloušťka vrstvy
H	(mm) vzdálenost drah laseru
P _L	(W) výkon laseru
v _s	(mm/s) skenovací rychlost

10 SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ**10**

Obr. 1-1 Průběh vyrábění a finální vyrobená součást [33]	13
Obr. 2-1 Oblasti využití aditivní výroby [4]	14
Obr. 2-2 Počet ročně prodaných průmyslových zařízení pro aditivní výrobu [5]	15
Obr. 2-3 Princip tvorby jednotlivých návarů [6]	15
Obr. 2-4 Schéma principu SLM [7]	16
Obr. 2-5 Přehled procesních parametrů [8]	17
Obr. 2-6 Závislost výkonu laseru na výsledné porositě pro materiál 316L [9]	18
Obr. 2-7 Procesní mapa pro určení optimálního výkonu laseru a rychlosti skenování [9]	18
Obr. 2-8 Vliv skenovací rychlosti; výkon laseru 50 W [10]	19
Obr. 2-9 Vliv skenovací rychlosti; výkon laseru 100 W [10]	19
Obr. 2-10 Závislost vzdálenosti drah laseru na relativní hustotě [8]	20
Obr. 2-11 Vliv tloušťky vrstvy prášku na kvalitu liniového vzorku [6]	20
Obr. 2-12 Porovnání jednotlivých svarů pro různé hodnoty skenovací rychlosti [11]	21
Obr. 2-13 Metalurgické póry (hydrogen porosity) při rychlosti skenování 2250 a 250 mm/s [12]	22
Obr. 2-14 Keyhole póry s "uvězněným" neroztaveným práškem [13]	22
Obr. 2-15 Vznik key hole póru [14]	22
Obr. 2-16 Vliv Marangoniho sil a proudění v tavenině [10]; a) Popis proudění v tavenině	23
Obr. 2-17 Schématický popis pohybu bublin uvnitř taveniny pro různé hodnoty LED [14]	24
Obr. 2-18 příčné trhliny nalezené ve vzorcích svaru z materiálu 7075 [15]	25
Obr. 4-1 Orientační závislost meze pevnosti a hustoty materiálů	27
Obr. 4-2 Prášek hliníkové slitiny AlZn5,5MgCu	28
Obr. 4-3 Zařízení SLM 280 ^{HL} [23]	29
Obr. 4-4 Popis zařízení SLM 280 ^{HL} [31]	30
Obr. 4-5 Popis stavěcí komory [24]	31
Obr. 4-6 Zpracování dat pro výrobu SLM	31
Obr. 4-7 Prostředí Materialise Magisc	32
Obr. 4-8 Pravidelné pole vzorků	33
Obr. 4-9 Material Development Modul	33
Obr. 4-10 Obousměrná skenovací strategie s pootočením o 79°	34
Obr. 4-11 Postup vyhodnocování vzorků: 1) původní vzorek; 2) broušený, vzorek; 3) vyleštěný vzorek	35
Obr. 4-12 Vzorky zalité do akrylátových puků	36
Obr. 4-13 Postup úpravy obrázku v programu ImageJ	37
Obr. 4-14 Funkce threshold	37
Obr. 4-15 Tabulka výsledků obrazové analýzy	37
Obr. 5-1 Sloupcový graf distribuce velikosti částic s kumulativní četností	38
Obr. 5-2 Schematicky označené procesní parametry prvního testu objemových vzorků	39
Obr. 5-3 Přehled snímků dle procesních parametrů se vzdáleností drah laseru 100 μm (test 1)	40

Obr. 5-4 Závislost skenovací rychlosti na relativní hustoty vzorků se vzdáleností drah laseru 100 μm (test 1)	41
Obr. 5-5 Závislost relativní hustoty na skenovací rychlosti při konstantním výkonu laseru 200 W (test 1)	41
Obr. 5-6 Závislost objemové hustoty energie na relativní hustoty vzorků (test 1)	42
Obr. 5-7 Výbrusy vzorků seřazeny dle skenovací rychlosti a výkonu laseru [25]	43
Obr. 5-8 Tvar a základní rozměry vzorků druhé stavby	43
Obr. 5-9 Schematicky označené procesní parametry druhého testu objemových vzorků	44
Obr. 5-10 Přehled snímků dle procesních parametrů se vzdáleností drah laseru 100 μm (test 2)	45
Obr. 5-11 Porovnání testů objemových vzorků, a) první experiment; b) druhý experiment	46
Obr. 5-12 Závislost skenovací rychlosti na relativní hustoty vzorků se vzdáleností drah laseru 100 μm (test 2)	47
Obr. 5-13 Závislost relativní hustoty na skenovací rychlosti při konstantním výkonu laseru 200 W (test 2)	47
Obr. 5-14 Závislost objemové hustoty energie na relativní hustoty vzorků (test 2)	48
Obr. 5-15 Rozložení objemových vzorků (test 3)	48
Obr. 5-16 Porovnání vzorků třetí stavby: a) Skenovací rychlost 155 mm/s; b) skenovací rychlost 300 mm/s	49
Obr. 5-17 Přehled snímků dle výkonu 200 W a skenovací rychlosti 155-300 mm/s (test 3)	49
Obr. 5-18 Závislost skenovací rychlosti na relativní hustotě vzorku při použitém výkonu laseru 200 W (test 3)	50
Obr. 5-19 Závislost skenovací rychlosti na relativní hustotě vzorku při použitém výkonu laseru 200 W (test 4)	51
Obr. 5-20 Přehled snímků dle výkonu 200 W a skenovací rychlosti 50-140 mm/s (test 4)	51
Obr. 5-21 Kompletní závislost skenovací rychlosti na relativní hustotě vzorku při použitém výkonu laseru 200 W	52
Obr. 5-22 Tvar a rozměry vzorku s podporami	53
Obr. 5-23 Rozložení vzorků na platformě a volené procesní parametry (test s podpurnými strukturami)	54
Obr. 5-24 Přehled snímků dle výkonu laseru a skenovací rychlosti (test s podpurnými strukturami)	54
Obr. 5-25 Porovnání vzorků z hlediska směru šíření trhlin (test na podpurných strukturách)	55
Obr. 5-26 Porovnání směru šíření trhlin pro různé vrstvy (výkon laseru 200 W, skenovací rychlost 155 mm/s)	55
Obr. 5-27 Vertikální řez vzorkem (výkon laseru 200 W, skenovací rychlost 155 mm/s)	56
Obr. 5-28 Vertikální řez vzorkem (výkon laseru 300 W, skenovací rychlost 800 mm/s)	56
Obr. 5-29 Vysokoteplotní vyhřívání jednotka [27]	57
Obr. 5-30 Pracovní prostor s vysokoteplotní jednotkou	57
Obr. 5-31 Rozmístění vzorků na stavěcí platformě se zvolenými parametry (test za zvýšené teploty)	58

Obr. 5-32 Přehled snímků dle výkonu laseru a skenovací rychlosti (test za zvýšených teplot)	59
Obr. 5-33 Závislost skenovací rychlosti na relativní hustotě vzorku (test za zvýšených teplot)	60
Obr. 5-34 Vliv výhřevu platformy (rozměry vzorku 10 x 10, výkon laseru 200 W, skenovací rychlost 500 mm/s)	60
Obr. 5-35 Vzorky vybrané na rozbor mikrostruktury; a) s velkým množstvím metalurgických pórů, b) s velkým množstvím keyhole pórů, c) velkým množstvím trhlin	61
Obr. 5-36 Mikrostruktura vzorku s velkým množstvím metalurg. pórů	61
Obr. 5-37 Mikrostruktura vzorku velkým obsahem trhlin	61
Obr. 5-38 Vznik trhlin ve směru sken.	62
Obr. 5-39 "Rozvětvení" trhliny tvorbou následující vrstvy	62
Obr. 5-40 Rozdíl mezi šířením trhliny a) keyhole pórem; b) metalurgickým pórem	62
Obr. 5-41 Přenosný tvrdoměr DYNA TH-1100	62
Obr. 5-42 Závislost tvrdosti na relativní hustotě	63
Obr. 5-43 Závislost tvrdosti na obj. hustotě energie	63
Obr. 5-44 Závislost tvrdosti na skenovací rychlosti vzorků vyrobených za zvýšené teploty.	64
Obr. 6-1 Porovnání výsledků relativní hustoty (výkon laseru 400 W, skenovací rychlost 1200 mm/s)	65
Obr. 6-2 Porovnání mikrostruktury s tvářeným materiálem	66

11 SEZNAM TABULEK

Tab. 4-1 Legující prvky materiálu EN AW 7075 dle normy [21]	28
Tab. 4-2 Značení hliníkové slitiny dle norem [24]	28
Tab. 4-3 Technické parametry SLM 280 ^{HL} [25]	29
Tab. 5-1 tabulka velikostí částic	38
Tab. 5-2 Porozita vzorků v procentech [%]	54
Tab. 5-3 Tvrdost vzorků s využitím podpůrných struktur	63
Tab. 5-4 Tvrdost vzorků vyrobených za zvýšené teploty	64

12 SEZNAM PŘÍLOH

- Příloha 1** Distribuce částic prášku (Horiba LA 950)
Příloha 2: Přehledové grafy prvního testu (vzdálenost drah laseru 130,150 μm)
Příloha 3: Závislosti na relativní hustotě prvního testu
Příloha 4: Přehledové grafy druhého testu (vzdálenost drah laseru 130,150 μm)
Příloha 5: Závislosti na relativní hustotě druhého testu
Příloha 6: Porovnání vlivu výhřevu platformy

Externí přílohy

- Příloha 7** LPW Test Certificate
Příloha 8 Powder Evaluation Report
Příloha 9 Publikace

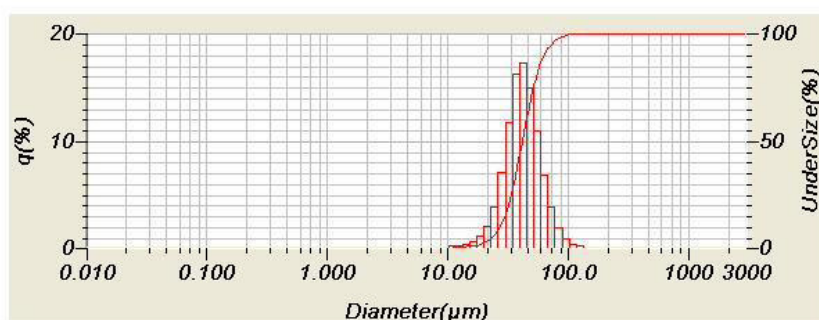
Příloha 1: Distribuce částic prášku (Horiba LA 950)

2017.04.27 02:20:04

HORIBA

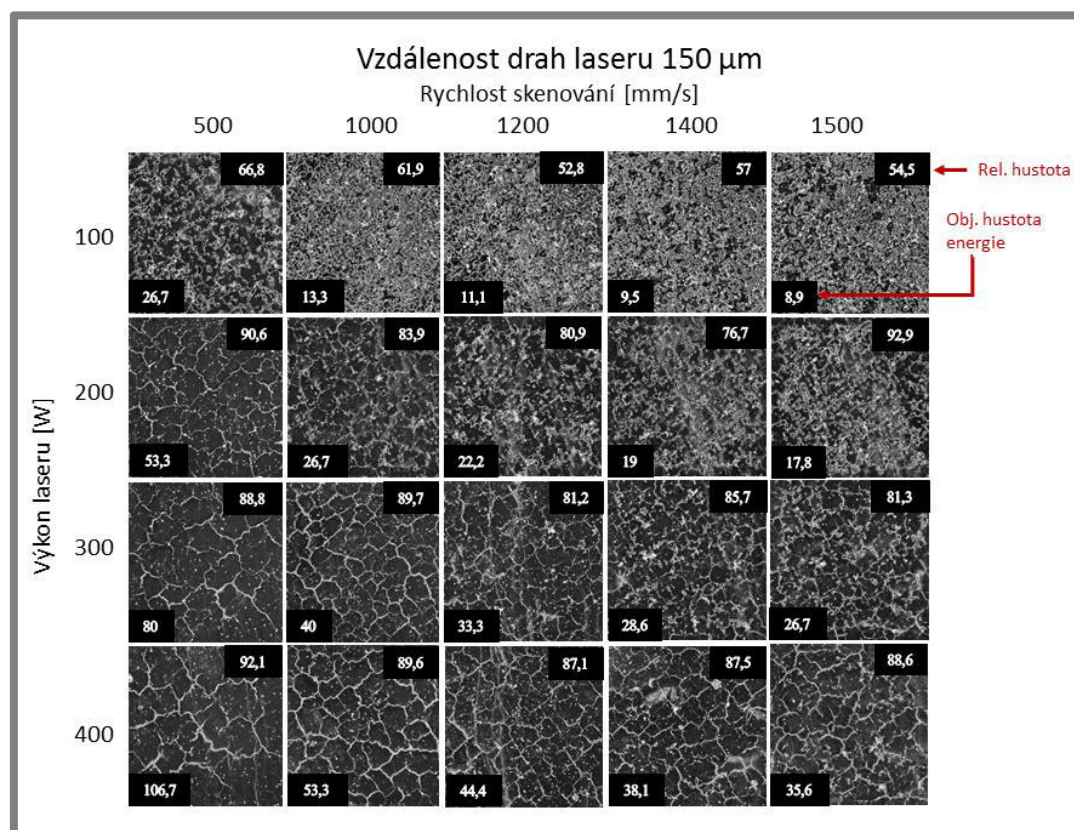
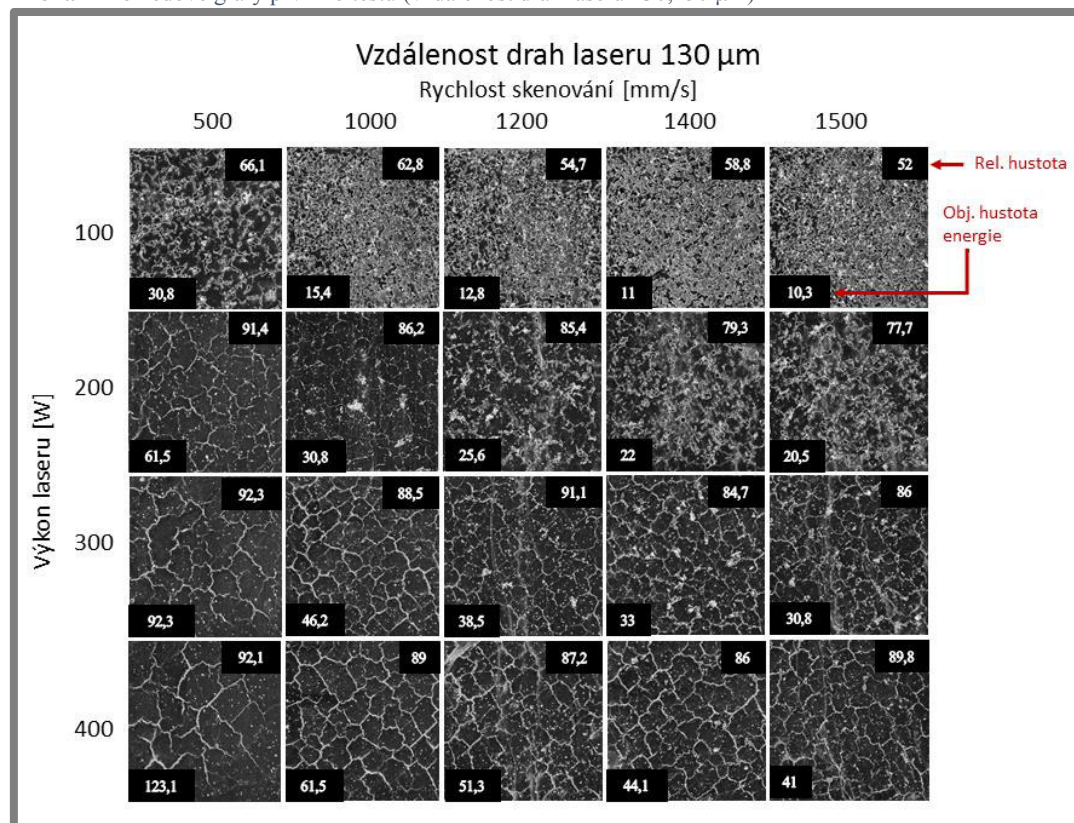
Laser Scattering Particle Size Distribution Analyzer LA-950

Sample Name	: hliník	Median Size	: 41.45659(μm)
Data Name	: ENAEW7075 AlZn5.5MgCu	Mean Size	: 43.88585(μm)
Transmittance(R)	: 71.7(%)	Std.Dev.	: 15.3976(μm)
Transmittance(B)	: 78.8(%)	Geo.Mean Size	: 41.3942(μm)
Circulation Speed	: 6	Geo.Std.Dev.	: 1.4109(μm)
Agitation Speed	: 6	Mode Size	: 41.7807(μm)
Ultra Sonic	: OFF	Span	: OFF
Form of Distribution	: Auto	Diameter on Cumulative %	: (2)10.00 (%) - 27.1046(μm)
Distribution Base	: Volume		: (9)90.00 (%) - 63.8768(μm)
Refractive Index (R)	: Aluminum[Aluminum(1.600 - 5.400i).Water(1.333)]		
Refractive Index (B)	: Aluminum[Aluminum(1.600 - 5.400i).Water(1.333)]		
Material	: Al		

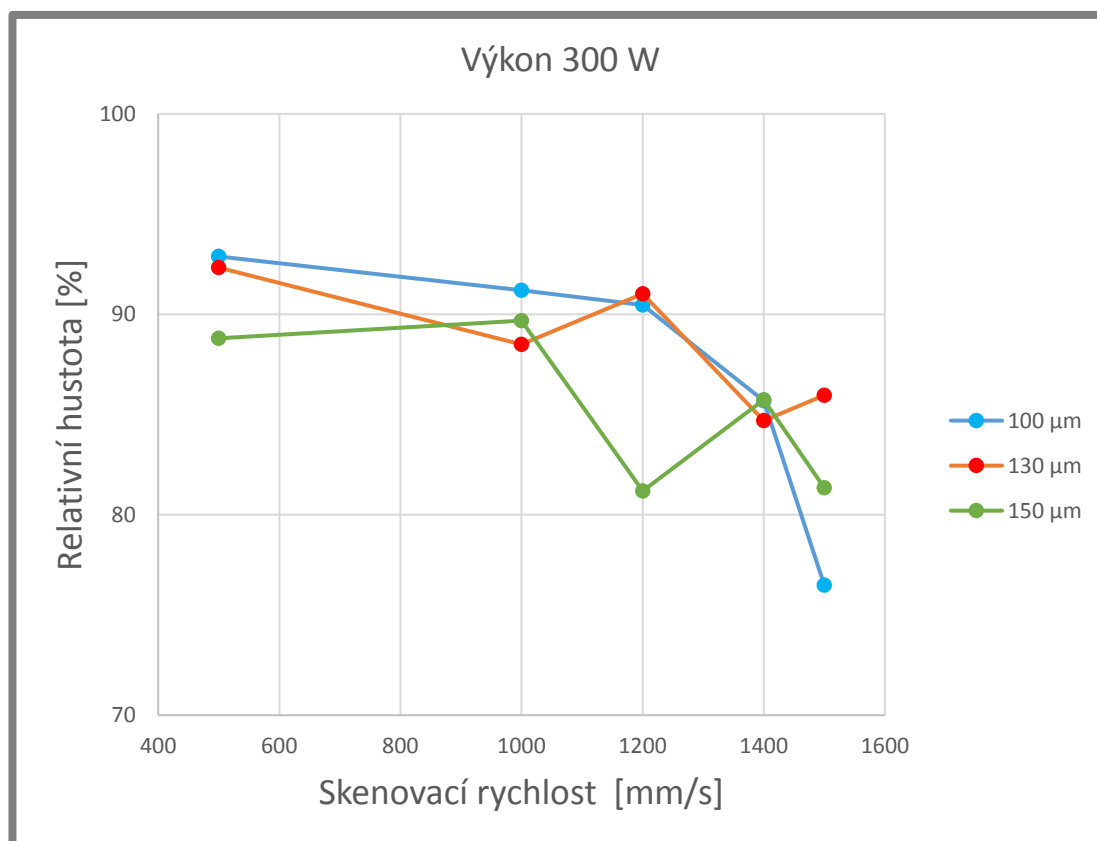
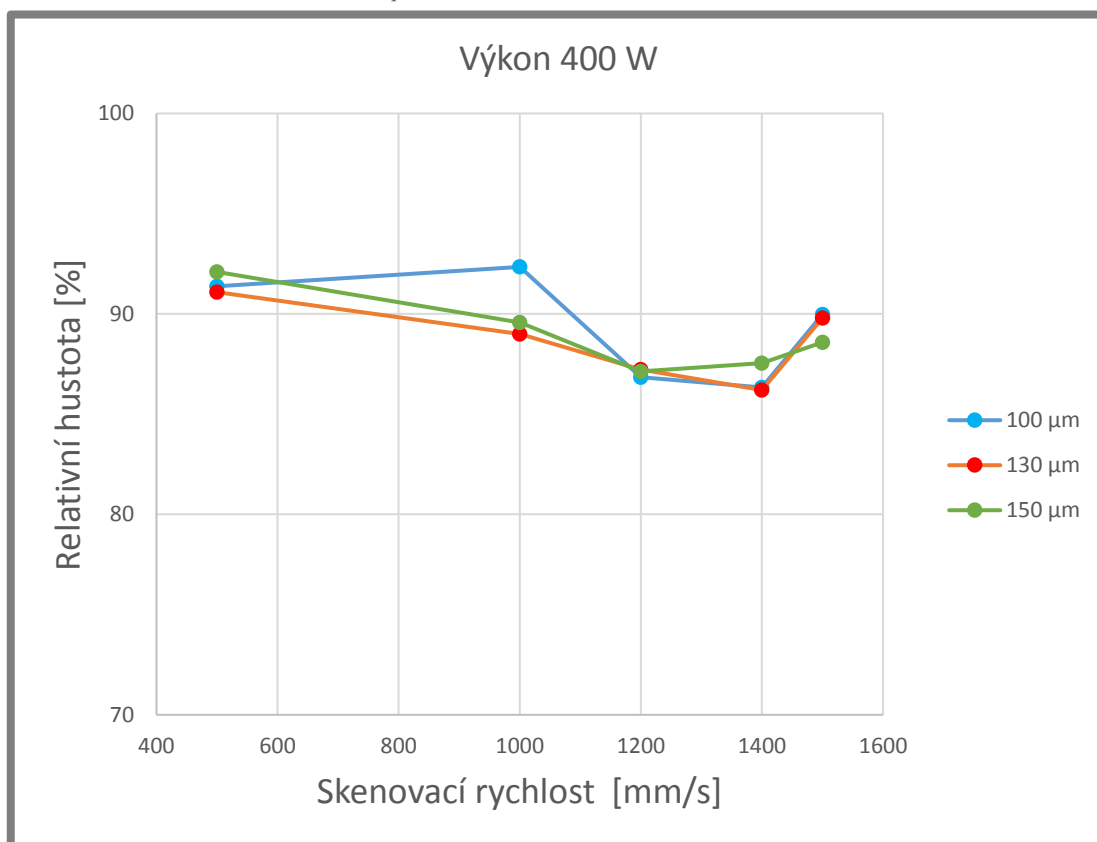


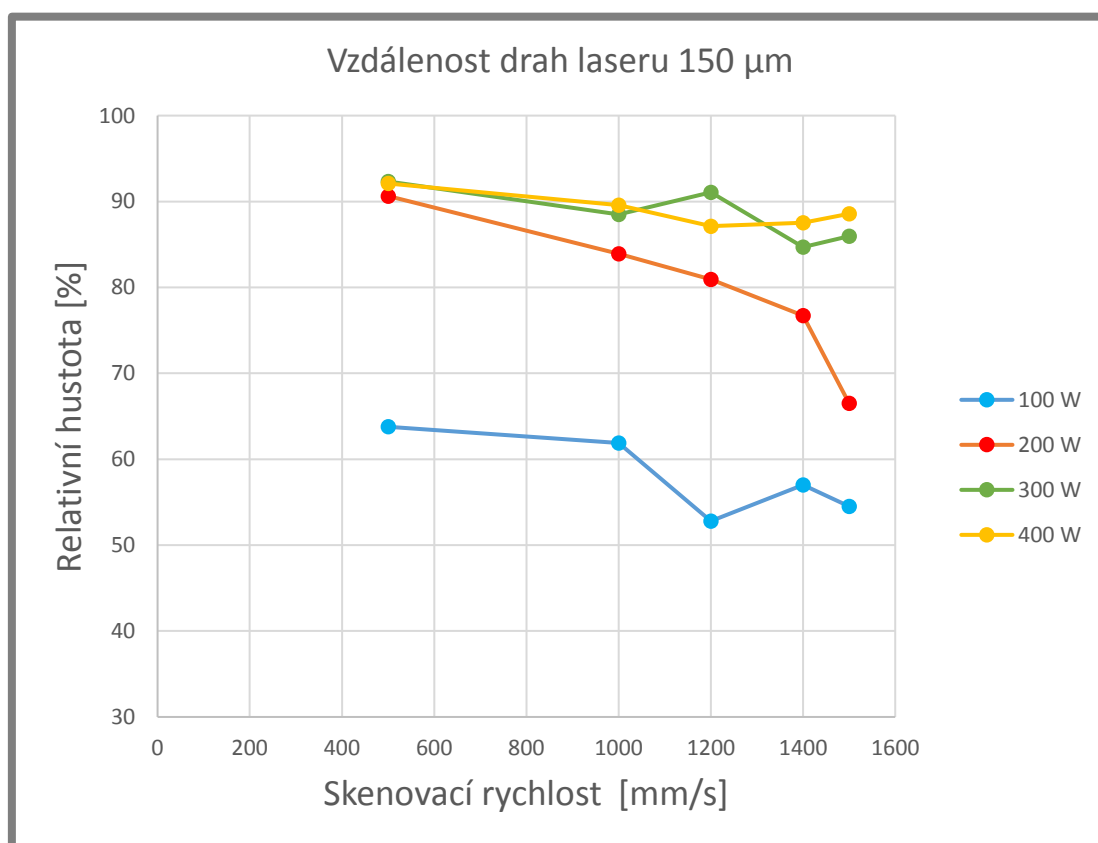
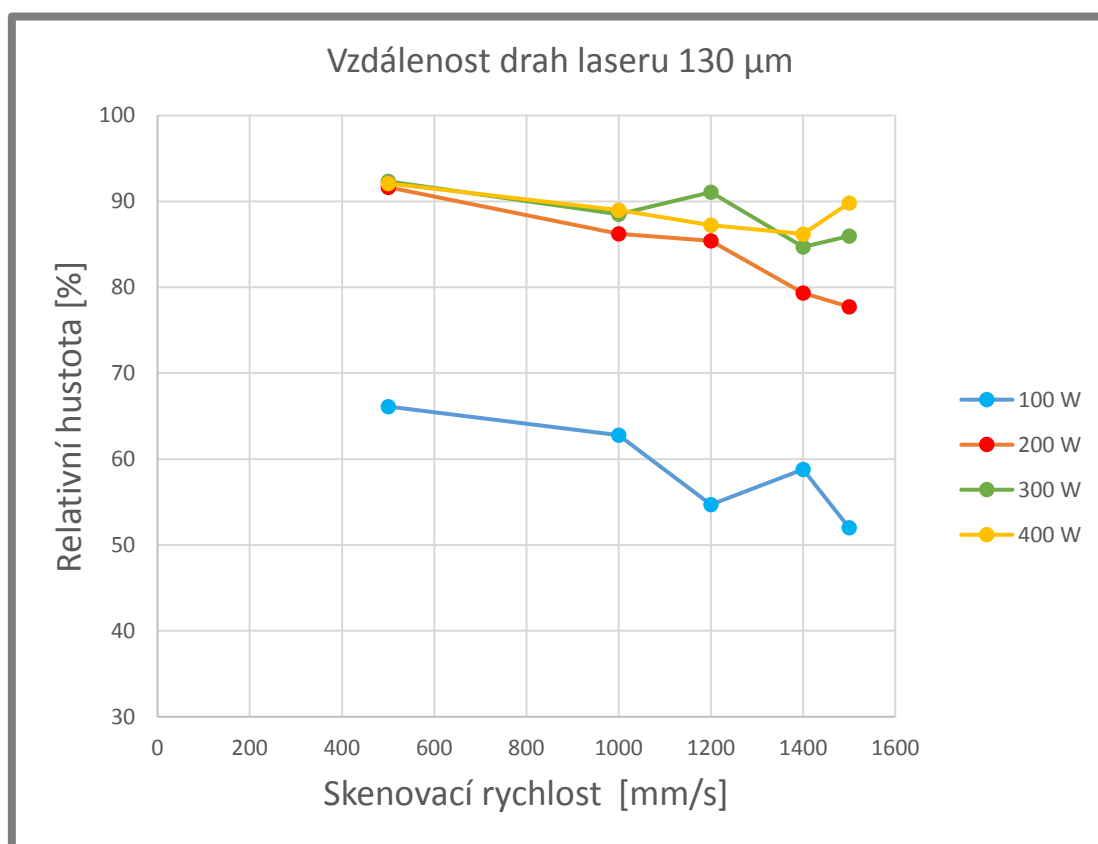
No.	Diameter(μm)	q(%)	UnderSize(%)	No.	Diameter(μm)	q(%)	UnderSize(%)	No.	Diameter(μm)	q(%)	UnderSize(%)
1	0.011	0.000	0.000	25	0.296	0.000	0.000	49	7.697	0.000	0.000
2	0.013	0.000	0.000	26	0.339	0.000	0.000	50	8.816	0.000	0.000
3	0.015	0.000	0.000	27	0.389	0.000	0.000	51	10.097	0.000	0.000
4	0.017	0.000	0.000	28	0.445	0.000	0.000	52	11.565	0.132	0.132
5	0.020	0.000	0.000	29	0.510	0.000	0.000	53	13.246	0.204	0.335
6	0.022	0.000	0.000	30	0.584	0.000	0.000	54	15.172	0.332	0.667
7	0.025	0.000	0.000	31	0.669	0.000	0.000	55	17.377	0.572	1.239
8	0.029	0.000	0.000	32	0.766	0.000	0.000	56	19.904	1.041	2.281
9	0.034	0.000	0.000	33	0.877	0.000	0.000	57	22.797	1.978	4.259
10	0.039	0.000	0.000	34	1.005	0.000	0.000	58	26.111	3.804	8.064
11	0.044	0.000	0.000	35	1.151	0.000	0.000	59	29.907	7.039	15.102
12	0.051	0.000	0.000	36	1.318	0.000	0.000	60	34.255	11.738	26.840
13	0.058	0.000	0.000	37	1.510	0.000	0.000	61	39.234	16.190	43.030
14	0.067	0.000	0.000	38	1.729	0.000	0.000	62	44.938	17.171	60.201
15	0.076	0.000	0.000	39	1.981	0.000	0.000	63	51.471	14.929	75.130
16	0.087	0.000	0.000	40	2.269	0.000	0.000	64	58.953	10.857	85.987
17	0.100	0.000	0.000	41	2.599	0.000	0.000	65	67.523	6.791	92.778
18	0.115	0.000	0.000	42	2.976	0.000	0.000	66	77.339	3.860	96.638
19	0.131	0.000	0.000	43	3.409	0.000	0.000	67	88.583	1.929	98.567
20	0.150	0.000	0.000	44	3.905	0.000	0.000	68	101.460	0.876	99.443
21	0.172	0.000	0.000	45	4.472	0.000	0.000	69	116.210	0.383	99.826
22	0.197	0.000	0.000	46	5.122	0.000	0.000	70	133.103	0.174	100.000
23	0.226	0.000	0.000	47	5.867	0.000	0.000	71	152.453	0.000	100.000
24	0.259	0.000	0.000	48	6.720	0.000	0.000	72	174.616	0.000	100.000

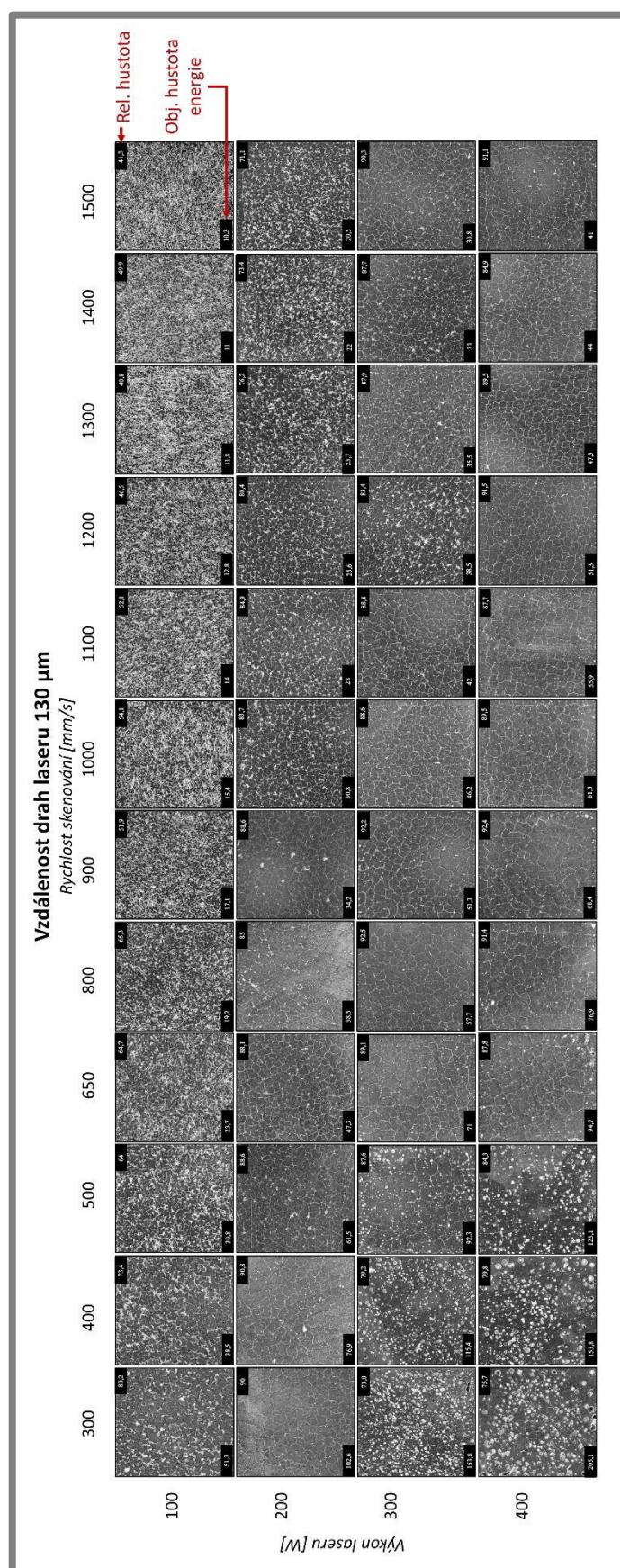
1 / 1

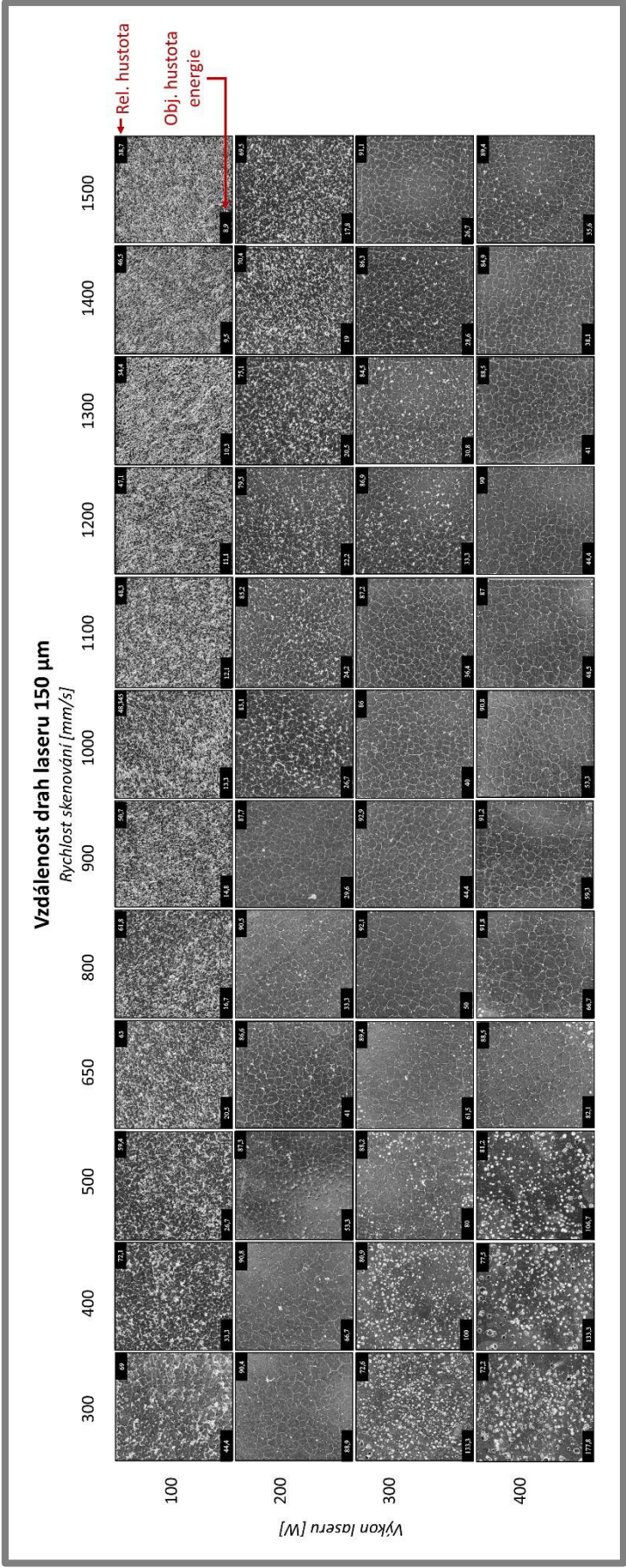
Příloha 2 Přehledové grafy prvního testu (vzdálenost drah laseru 130,150 μm)

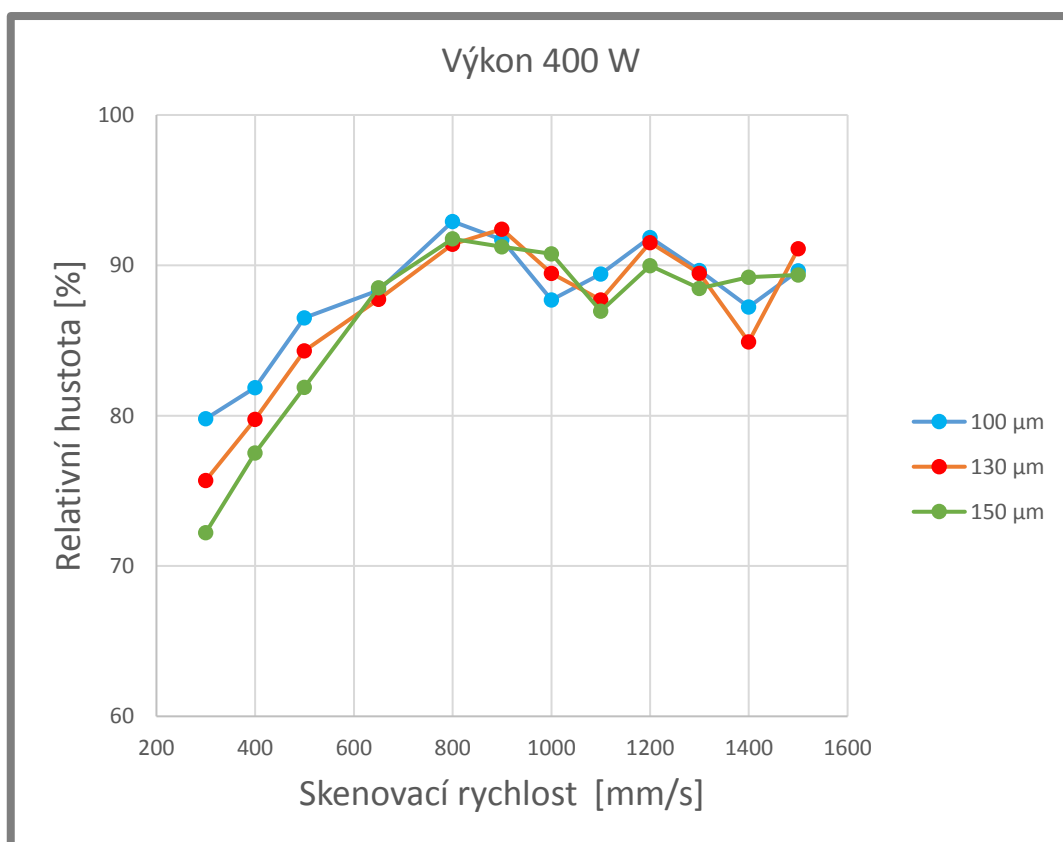
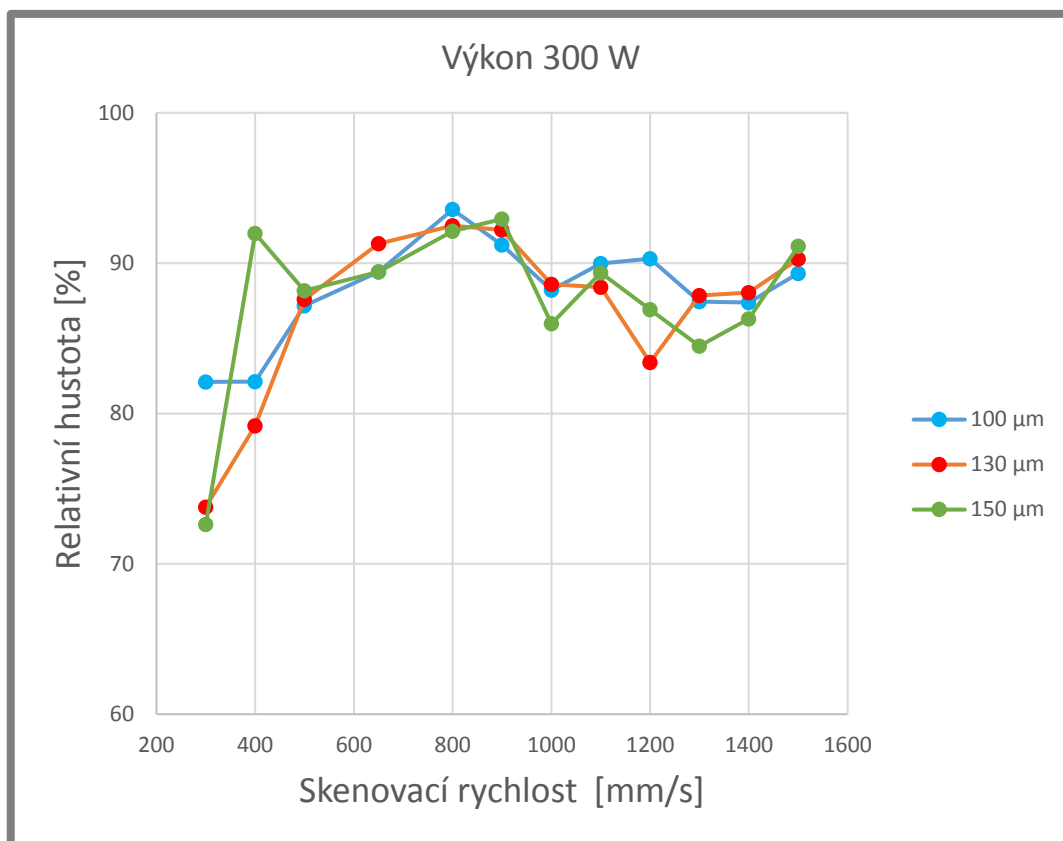
Příloha 3 Závislosti na relativní hustotě prvního testu

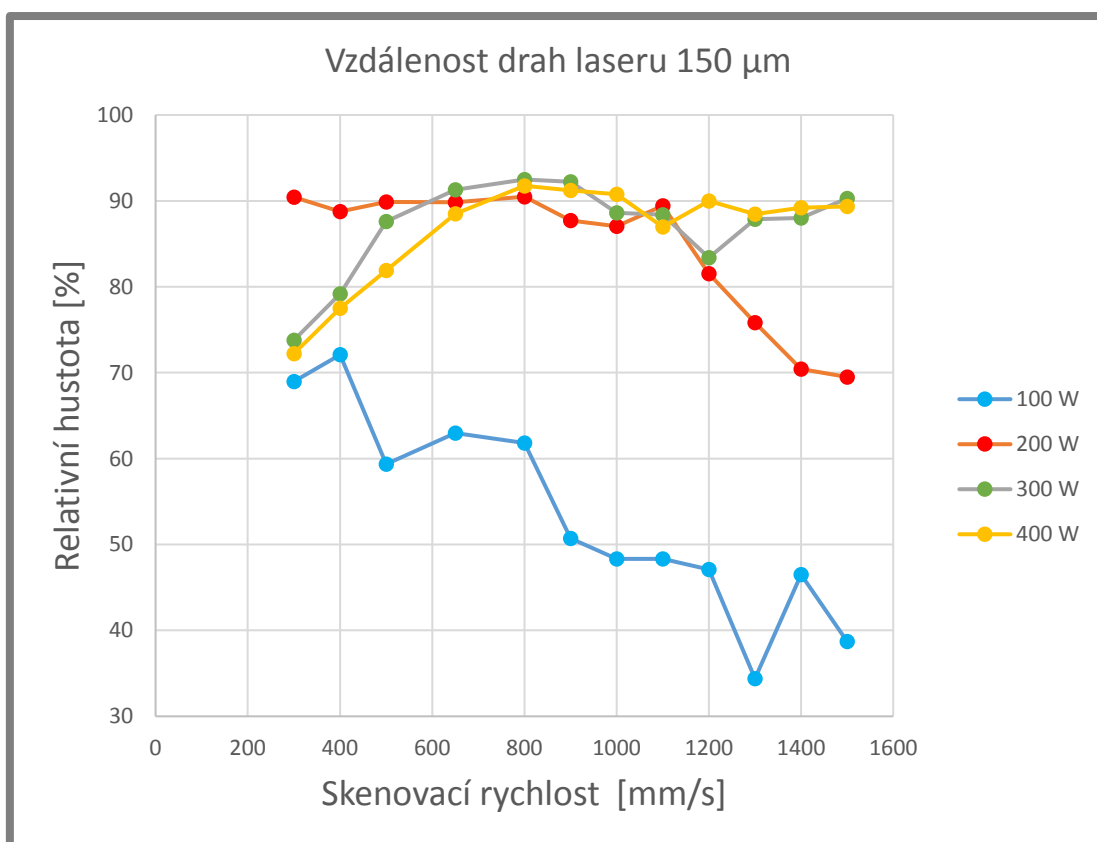
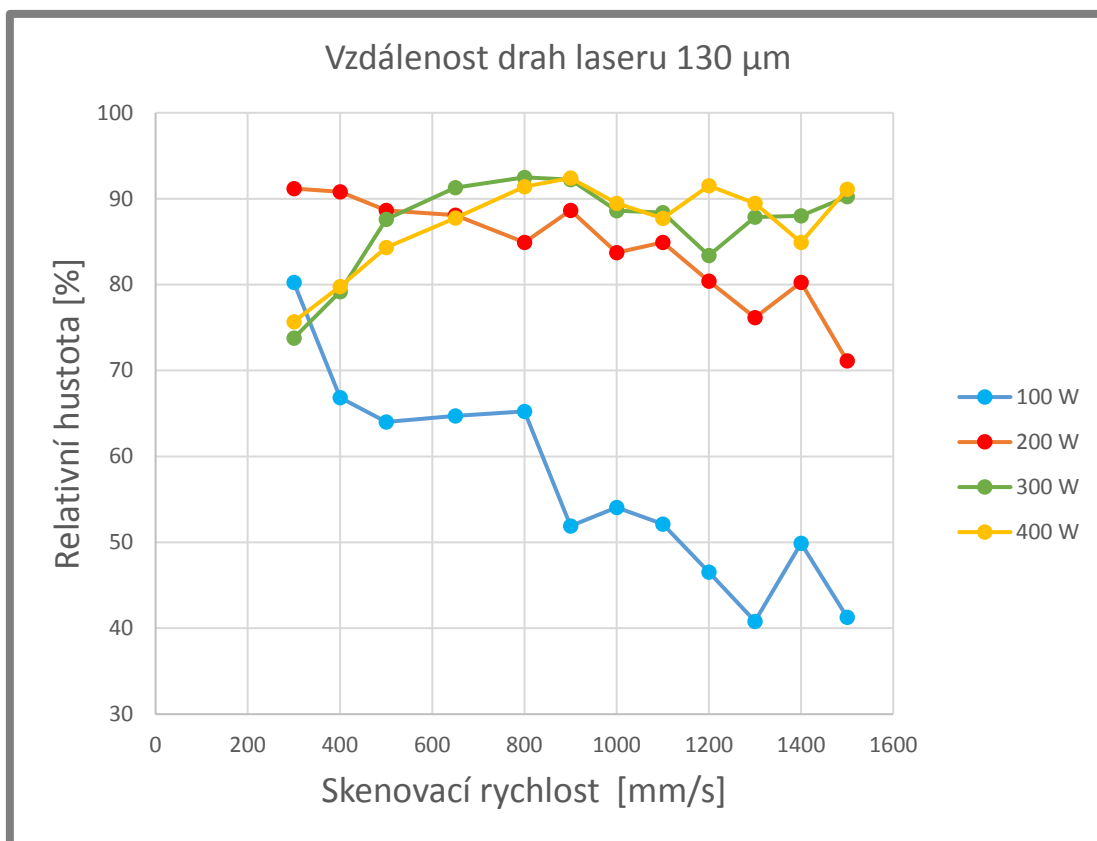




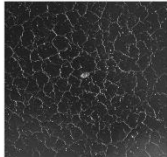
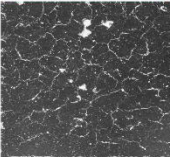
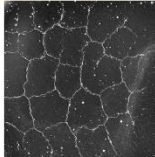
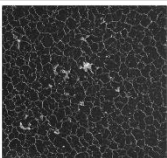
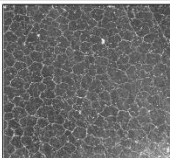
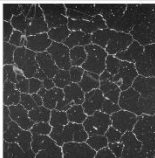
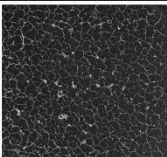
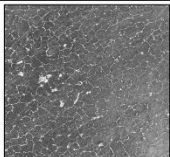
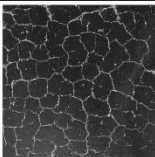
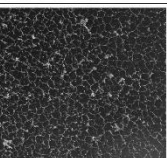
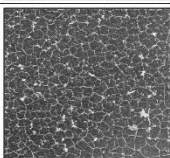
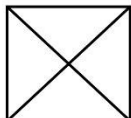
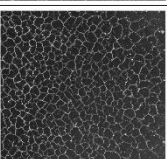
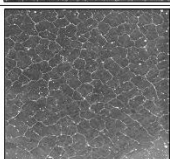
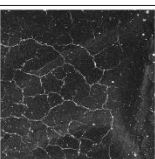
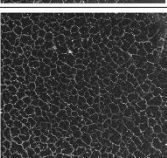
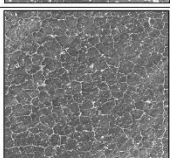
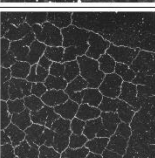
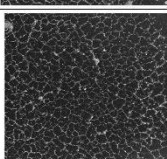
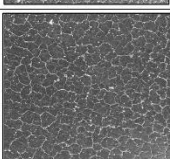
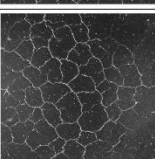
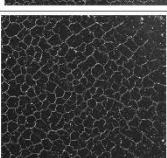
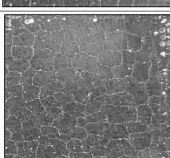
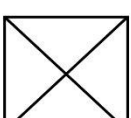
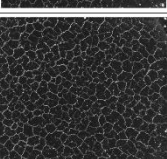
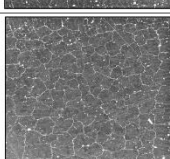
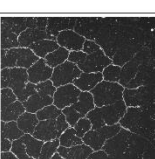
Příloha 4 Přehledové grafy druhého testu (vzdálenost drah laseru 130,150 μm)







Příloha 5 Porovnání vlivu výhřevu platformy

Parametry	80°C	200°C	400°C
$P_L = 200 \text{ W}$ $v_f = 200 \text{ mm/s}$ $E = 200 \text{ J/mm}^3$			
$P_L = 200 \text{ W}$ $v_f = 500 \text{ mm/s}$ $E = 80 \text{ J/mm}^3$			
$P_L = 200 \text{ W}$ $v_f = 800 \text{ mm/s}$ $E = 50 \text{ J/mm}^3$			
$P_L = 200 \text{ W}$ $v_f = 1000 \text{ mm/s}$ $E = 40 \text{ J/mm}^3$			
$P_L = 300 \text{ W}$ $v_f = 800 \text{ mm/s}$ $E = 75 \text{ J/mm}^3$			
$P_L = 300 \text{ W}$ $v_f = 1000 \text{ mm/s}$ $E = 60 \text{ J/mm}^3$			
$P_L = 300 \text{ W}$ $v_f = 1200 \text{ mm/s}$ $E = 50 \text{ J/mm}^3$			
$P_L = 400 \text{ W}$ $v_f = 800 \text{ mm/s}$ $E = 100 \text{ J/mm}^3$			
$P_L = 400 \text{ W}$ $v_f = 1000 \text{ mm/s}$ $E = 80 \text{ J/mm}^3$			
$P_L = 400 \text{ W}$ $v_f = 1200 \text{ mm/s}$ $E = 67 \text{ J/mm}^3$	